



Escola Tècnica Superior d'Enginyers  
de Camins, Canals i Ports de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

## PROJECTE O TESINA D'ESPECIALITAT

### Títol

**Acumulació de sòlids a aiguamolls construïts. Relació amb el  
procés de clogging.**

### Autor/a

**Elisenda Alba Pla**

### Tutor/a

**Joan Garcia Serrano i Anna Pedescoll Abacar**

### Departament

**Enginyeria Hidràulica, Marítima i Ambiental**

### Intensificació

**Enginyeria Ambiental**

### Data

**Juny 2010**



## Agraïments

Primerament, vull expressar el meu sincer agraïment a Joan Garcia, tutor d'aquest estudi, per haver-me donat l'oportunitat de realitzar-lo, ja que durant aquest temps he tingut la sort d'aprendre molt més del que sabia sobre els aiguamolls construïts.

Agrair sobretot a l'Anna Pedescoll, la seva paciència i dedicació en aquest estudi ja que sense ella no hagués estat possible dur-lo a terme.

En especial, gràcies a en Roger Samsó, amb qui, juntament amb en Javier Carretero, vam passar estones molt agradables tot i que dures en les campanyes de camp dutes a terme als diferents aiguamolls.

Gràcies també a totes les persones del departament d'Enginyeria Ambiental que, en un moment o altre han estat disposades a animar-me i a seguir endavant amb l'estudi.

Agrair també la col·laboració de la Fabiana Passos, amb qui vaig compartir molts dels millors moments al laboratori del departament durant l'anàlisi de les graves. També doncs, gràcies als tècnics del laboratori de geotècnia per permetre'ns disposar de tot allò que necessitèssim en qualsevol moment.

Als meus pares, Francisco i Josefina. Sense ells no estaria on estic ni seria qui soc. Gràcies per tot el que m'heu donat i m'heu permès fer. Gràcies pels ànims i també per les esbrincades. Al meu germà Marc perquè, tot i fer-ho a la seva manera, expressa els seus ànims i afectes cap a mi. Us estimo.

A l'Isaac, gràcies simplement per estar al meu costat, mimar-me, entendre'm, animar-me, estimar-me i fer-me oblidar tots els mals moments. Gràcies per tot i per ser com ets.

Gràcies a tots.



## Resum

La construcció d'aiguamolls per al tractament d'aigües residuals urbanes en poblacions petites es posà en auge cap a la dècada dels anys 70. Aquests sistemes de tractament permeten obtenir una bona qualitat d'aigua depurada mitjançant un baix cost econòmic i una bona integració amb l'entorn natural. Tot i així, el principal problema en l'explotació dels aiguamolls construïts de flux subsuperficial (on l'aigua residual circula en un medi granular plantat amb macròfits) és la colmatació de la grava. Aquest fenomen consisteix en la obturació dels porus del material filtrant degut a l'acumulació de sòlids de diverses procedències que condueix a una pèrdua de porositat i conductivitat hidràulica de la grava de què es componen aquests aiguamolls. Si la colmatació és molt severa fa que l'aigua circuli en superfície, fet que desemboca en una pèrdua de l'eficiència de l'aiguamoll com a sistema de tractament de l'aigua.

Aquest estudi es centra en la mesura de la colmatació a partir de l'acumulació de sòlids com a indicador en dos aiguamolls construïts de flux subsuperficial horitzontal a Catalunya (Gualba i Arnes).

Per a l'estudi del fenomen de la colmatació s'han extret mostres de diferents punts dels aiguamolls i s'han quantificat els sòlids i analitzat llurs propietats de decantabilitat i volatilitat. Els resultats obtinguts mostren que l'aiguamoll de Gualba presenta entre 2 i 3 vegades més acumulació de sòlids totals tant a l'entrada (118 g ST/kg grava) com a la sortida (318 g ST/kg grava) que l'aiguamoll d'Arnes (84 g ST/kg grava a l'entrada i 128 g ST/kg grava a la sortida) i que la decantabilitat dels sòlids és menor a Gualba (266 mL/L a l'entrada i 113 mL/L a la sortida) que no pas a Arnes (233 mL/L a l'entrada i 64 mL/L a la sortida). Gualba presenta menor quantitat de sòlids volàtils que Arnes, i per tant, el contingut en matèria inorgànica és major (100 g M.Inorg/kg grava a l'entrada i 306 g M.Inorg/kg grava a la sortida de Gualba i 48 g M.Inorg/kg grava a l'entrada i 110 g M.Inorg/kg grava a la sortida d'Arnes). Aquesta major quantitat de matèria inorgànica a Gualba en comparació amb Arnes, ens porta a la necessitat d'estudiar si la seva procedència té alguna relació amb la degradació del material filtrant de l'aiguamoll.

Per això, s'ha realitzat la difracció de rajos X de les graves així com les seves resistències mecànica i química. La difracció de rajos X indica que la grava d'Arnes es compon bàsicament de minerals carbonatats (dolomita i calcita) i que la grava de Gualba és granítica (quars, albïta i biotita). Els assajos de resistència mecànica mostren que la grava de Gualba és menys resistent a esforços mecànics i que la grava d'Arnes presenta menys resistència a l'atac químic, fets que concorden amb la mineralogia trobada mitjançant la difracció de rajos X. Tot i així, els valors de pèrdua de material obtinguts amb els assajos aplicats de resistència química són molt baixos, mentre que la resistència mecànica sembla tenir un paper més important en el manteniment de les propietats de la grava com a material filtrant en aiguamolls construïts. Amb els resultats obtenim que una grava com la d'Arnes, d'origen fluvial i calcària és una bona opció, tan per la seva resistència com pel seu arrodoniment, que facilita la circulació de l'aigua. Aplicar graves, doncs, com la de Gualba, promou la disgregació del material i, per tant, l'acumulació ràpida de matèria sòlida al llit de l'aiguamoll i la disminució de la porositat del medi filtrant, exacerbant la colmatació.

A part de la influència del tipus de grava en quant a l'acumulació de sòlids, és de rellevant importància el disseny i configuració de cada aiguamoll. S'ha vist que, relacions longitud - amplada menors a 1 provoquen trajectòries no uniformes de l'aigua a través del material filtrant, creant així camins preferencials en els quals es concentra major quantitat de sòlids. A més, una mala distribució de l'aigua d'entrada també esdevé en major cabal afluent en uns punts que en d'altres i, per tant, major acumulació de sòlids en els mateixos. Així doncs, cal incidir en tots aquests aspectes de disseny per tal d'optimitzar el comportament hidràulic de l'aiguamoll i allargar la seva vida útil.



## Abstract

The construction of wetlands for the treatment of urban wastewater in small populations began to boom in the late 70s. These treatment systems can provide a good quality of purified water using a low cost and good integration with the natural environment. However, the main problem in the exploitation of subsurface flow constructed wetlands (where the wastewater flows into a granular medium planted with macrophytes) is the clogging of the gravel. This phenomenon consists in filling the pores of the filter material due to accumulation of solids of various origins leading to a loss of porosity and hydraulic conductivity of gravel which compose these wetlands. If the clogging is severe makes the surface water flows, which leads to a loss of efficiency of the wetland as a water treatment system.

This study focuses on the extent of clogging from the accumulation of solids as an indicator in two horizontal subsurface flow constructed wetlands in Catalonia (Gualba and Arnes).

To study the phenomenon of clogging samples taken from different points of wetlands have been analyzed and quantified the solids and their properties of volatility and decantability. The results show that the wetland of Gualba has between 2 and 3 times more accumulation of total solids in the entrance (118 g ST / kg gravel) and in the output (318 g ST / kg gravel) than the wetland of Arnes (84 g ST / kg gravel at the entrance and 128 g ST / kg gravel at the output) and the sludge decantability in Gualba (266 mL / L at the entrance and 113 mL / L at the exit) is smaller than in Arnes (233 mL / L at the entrance and 64 mL / L at the exit). Gualba presents fewer volatile solids than Arnes, and therefore inorganic matter content is higher (100 M.Inorg g / kg gravel at the entrance and 306 g M.Inorg / kg gravel at the exit of Gualba and 48 g M.Inorg / kg gravel at the entrance and 110 g M.Inorg / kg gravel at the exit of Arnes). This greater amount of inorganic matter in Gualba compared to Arnes, leads to the need to consider whether their origin has any relation with the degradation of the wetland filter materials.

Therefore, we carried out the X-ray Diffraction of the gravels and their mechanical and chemical resistance. The X-ray Diffraction indicates that the gravel of Arnes consists basically of carbonate minerals (calcite and dolomite) and the gravel of Gualba consists in granite (quartz, albite and biotite). The tests showed that the mechanical strength of Gualba gravel is less resistant to mechanical and the gravel of Arnes is less resistant to the chemical attack events that match the mineralogy found by X-ray Diffraction. However, material loss values obtained with the tests applied are very low chemical resistance, while the mechanical strength seems to play a greater role in maintaining the properties of the gravel as filter material in constructed wetland. With the results obtained in Arnes gravel, limestone and river of origin is a good option, as by its resistance as his round, which facilitates the movement of water. Apply gravel like the Gualba, promotes the disintegration of the material and therefore the rapid buildup of solids in the bed of the wetland and decreased porosity of the filter environment, exacerbating the clogging.

Apart from the influence of the type of records regarding the accumulation of solid, significant importance is the design and configuration of each wetland. Relationships between length - width less than 1, cause a non-uniform paths of water through the filter material, thus creating preferential pathways in which solids are concentrated much. In addition, poor distribution of water input also becomes greater inflow in some points than others and therefore greater accumulation of solids in them. So, should affect all aspects of design to optimize the hydraulic behavior of the wetland and prolong its life.





# Índex

<b>1. Introducció i antecedents</b>	<b>3</b>
<b>2. Objectius</b>	<b>5</b>
2.1. Principals	5
2.2. Específics	5
<b>3. Revisió bibliogràfica</b>	<b>7</b>
3.1. Aiguamolls construïts per al tractament d'aigües residuals urbanes	7
3.2. Aiguamolls construïts de flux subsuperficial horitzontal (SSF: subsurface flow)	8
3.2.1. Eliminació de contaminants	12
3.3. La colmatació (clogging)	14
3.3.1. Processos causants de la colmatació	15
3.3.2. Distribució espacial	17
3.3.3. Evolució temporal	18
3.3.4. Mesura de la colmatació	18
3.3.5. Material granular	19
<b>4. Materials i mètodes</b>	<b>21</b>
4.1. Descripció de les plantes d'estudi	21
4.1.1. Gualba	22
4.1.2. Arnes	25
4.2. Mostreig	29
4.2.1. Punts de mostreig	29
4.2.2. Presa de mostres	30
4.3. Acumulació de sòlids	31
4.3.1. Índex volumètric de fangs (IVF)	32
4.3.2. Sòlids totals (ST)	33
4.3.3. Sòlids volàtils (SV)	34
4.4. Anàlisi del material granular	34
4.4.1. Composició mineral	35
4.4.2. Resistència mecànica	36
4.4.3. Resistència química	42
<b>5. Resultats i discussió</b>	<b>47</b>
5.1. Acumulació de sòlids	47
5.2. Composició mineral	53
5.3. Resistències mecànica i química	55
<b>6. Conclusions</b>	<b>65</b>
<b>7. Recomanacions</b>	<b>67</b>
<b>8. Bibliografia</b>	<b>69</b>
<b>9. Annex de càlculs</b>	<b>69</b>
<b>10. Annex de figures</b>	<b>77</b>



## Índex de Figures

<b>Figura 3.1.1.</b> Esquema d'un aiguamoll construït de flux superficial (García and Corzo, 2008) a la figura A i esquema d'un aiguamoll construït de flux subsuperficial horitzontal a la figura B.	8
<b>Figura 3.2.1.</b> Sistema habitual d'entrada d'aigua als aiguamolls, format pel canal de distribució (esquerra) i els sobreeixidors (dreta).	10
<b>Figura 3.2.2.</b> Sistema d'entrada d'aigua amb tub perforat. S'observa l'acumulació sòlids impeding la correcta distribució de l'aigua.	10
<b>Figura 3.2.3.</b> Canonada d'extracció d'aigua dels aiguamolls.	11
<b>Figura 3.2.4.</b> Canyís, boga i jonc.	12
<b>Figura 3.3.1.</b> Circulació de flux superficial degut a la colmatació del material granular.	15
<b>Figura 3.3.1.1.</b> Imatge de detall de l'interior del material granular. S'hi observa la influència de les arrels i la bio pel·lícula (biofilm) en la reducció de la porositat (Kadlec and Knight, 1996).	17
<b>Figura 4.1.1.</b> Localització de sistemes de tractament amb aiguamolls construïts a Espanya (entre parèntesi hi ha el número de sistemes en determinades localitats). <u>Catalunya</u> : [1] Corbins, [2] Almatret, [3] Alfés, [4] El Masroig, [5] Verdú, [6] La Fatarella, [7] Gualba, [8] St. Martí de Sesgueioles, [9] Vilajuïga, [10] Arnes, [11] Pobla de Massaluca, [12] Vilaplana, [31] Cervià de Ter. (Puigagut <i>et al.</i> , 2007).	21
<b>Figura 4.1.1.1.</b> Localització geogràfica de la planta de tractament d'aigua de Gualba.	22
<b>Figura 4.1.1.2.</b> Canal d'entrada d'aigua de l'aiguamoll d'estudi de la planta depuradora de Gualba.	24
<b>Figura 4.1.1.3.</b> Esquema en planta de la EDAR de Gualba.	25
<b>Figura 4.1.2.1.</b> Localització geogràfica de la planta de tractament d'aigua d'Arnes.	25
<b>Figura 4.1.2.2.</b> Edifici del pretractament i tractament primari d'Arnes.	26
<b>Figura 4.1.2.3.</b> Tractament primari d'Arnes (decantació).	26
<b>Figura 4.1.2.4.</b> Imatge d'un dels dos aiguamolls que componen la planta de tractament d'Arnes. S'hi observen els murs de separació entre parcel·les.	27
<b>Figura 4.1.2.5.</b> Imatge d'un dels dos aiguamolls que componen la planta de tractament d'Arnes. S'hi observen els murs de separació entre parcel·les.	28
<b>Figura 4.1.2.6.</b> Vista en planta de la EDAR d'Arnes.	28
<b>Figura 4.2.1.1</b> Esquema dels punts analitzats a l'aiguamoll de Gualba.	30
<b>Figura 4.2.1.2.</b> Esquema dels punts analitzats a l'aiguamoll d'Arnes.	30
<b>Figura 4.3.1.</b> Esquema del procés de separació del fang de la grava de les mostres d'estudi (AUTOCAD).	32
<b>Figura 4.4.1.</b> Graves de Gualba (A) i Arnes (B).	35
<b>Figura 4.4.2.1.</b> Motlle i maça usats en l'assaig Proctor Normal.	37
<b>Figura 4.4.2.2.</b> Màquina de Los Angeles.	38
<b>Figura 4.4.2.3.</b> Esquema de les dimensions de l'equip d'assaig Sehudes.	40

<b>Figura 4.4.2.4.</b> Imatge de l'aparell usat en l'assaig de Sehudes. La presència de dos rodets ens permet realitzar l'assaig a dues graves al mateix temps.....	41
<b>Figura 4.4.3.1.</b> Imatge d'un agitador mitjançant sacsejades.....	44
<b>Figura 5.1.1.</b> Acumulació de sòlids totals en cadascun dels punts estudiats als aiguamolls de Gualba i Arnes respectivament.....	48
<b>Figura 5.1.2.</b> % de SV respecte dels ST en cadascun dels punts estudiats als aiguamolls de Gualba i Arnes respectivament.....	48
<b>Figura 5.1.3.</b> Decantabilitat en cadascun dels punts estudiats als aiguamolls de Gualba i Arnes respectivament.....	48
<b>Figura 5.1.4.</b> Relació entre el percentatge de SV/ST i l'índex volumètric de fangs a Gualba i a Arnes.....	52
<b>Figura 5.2.1.</b> Resultat de la difracció de rajos X de la grava de Gualba (A) i Arnes (B).....	54
<b>Figura 5.3.1.</b> Gràfic de pèrdua de material amb l'assaig de Desgast Mecànic als dos aiguamolls d'estudi.....	56
<b>Figura 5.3.2.</b> Comparació dels pesos abans i després de l'assaig de Los Angeles dels dos aiguamolls d'estudi.....	57
<b>Figura 5.3.3.</b> Diferència entre les corbes granulomètriques abans i després de l'assaig Proctor Normal. Es mostren les corbes dels dos aiguamolls d'estudi.....	58
<b>Figura 5.3.4.</b> Diferència entre les corbes granulomètriques abans i després de l'assaig Proctor Normal i tenint la mostra submergida en àcid durant una setmana de la grava de Gualba.....	61
<b>Figura 5.3.5.</b> Diferència entre les corbes granulomètriques abans i després de l'assaig Proctor Normal i tenint la mostra submergida en àcid durant una setmana de la grava d'Arnes.....	62
<b>Figura 5.3.6.</b> Comparació entre la pèrdua i guany de material de les graves dels aiguamolls de Gualba i Arnes.....	63
<b>Figura 10.1.</b> Diferència entre les corbes granulomètriques de la grava de Gualba abans i després de l'assaig Proctor Normal.....	77
<b>Figura 10.2.</b> Diferència entre les corbes granulomètriques de la grava de Gualba abans i després de l'assaig Proctor Normal.....	77

## Índex de Taules

<b>Taula 5.1.1.</b> Taxes d'acumulació de ST i SV, decantabilitat i IVF per a l'aiguamoll de Gualba en cadascun dels punts estudiats.....	50
<b>Taula 5.1.2.</b> Taxes d'acumulació de ST i SV, decantabilitat i IVF per a l'aiguamoll d'Arnes en cadascun dels punts estudiats.....	50
<b>Taula 5.3.1.</b> Pèrdua de material en l'assaig de resistència al Desgast Mecànic als aiguamolls de Gualba i Arnes.....	55
<b>Taula 5.3.2.</b> Valor del coeficient de Los Ángeles obtingut als aiguamolls de Gualba i Arnes.....	57
<b>Taula 5.3.3.</b> Valors mitjos de sulfats solubles en aigua, sulfats solubles en àcid i sulfats solubïes en aigua de la grava dels aiguamolls de Gualba i Arnes.....	59
<b>Taula 9.1.</b> Paràmetres característics de graves de diferents aiguamolls.....	73
<b>Taula 9.2.</b> ST, SV, IVF als diferents punts d'estudi de l'aiguamoll de Gualba.....	73
<b>Taula 9.3.</b> ST, SV, IVF als diferents punts d'estudi de l'aiguamoll d'Arnes.....	73
<b>Taula 9.4.</b> Dades obtingudes durant l'assaig de resistència al Desgast Mecànic.....	74
<b>Taula 9.5.</b> Dades obtingudes durant l'assaig de Los Ángeles.....	74
<b>Taula 9.6.</b> Dades de granulometria abans i després d'aplicar l'assaig a la grava de Gualba.....	75
<b>Taula 9.7.</b> Dades de granulometria abans i després d'aplicar l'assaig a la grava d'Arnes.....	75
<b>Taula 9.8.</b> Corbes granulomètriques abans i després d'aplicar l'assaig a la grava de Gualba...	75
<b>Taula 9.9.</b> Corbes granulomètriques abans i després d'aplicar l'assaig a la grava d'Arnes.....	76
<b>Taula 9.10.</b> Dades granulomètriques de la grava de Gualba per la comparació amb Arnes.....	76
<b>Taula 9.11.</b> Dades granulomètriques de la grava d'Arnes per la comparació amb Gualba.....	76



## 1. Introducció i antecedents

Els aiguamolls construïts (AC) formen part dels denominats sistemes naturals de tractament d'aigües residuals. Es denominen sistemes naturals, tot i ser construïts per l'home, perquè cap dels processos involucrats en la millora de la qualitat de l'aigua que hi tenen lloc fa necessària l'addició de productes químics ni el subministrament extern d'energia (García and Corzo, 2008). Aquests sistemes poden resultar una bona alternativa pel tractament d'aigües de diferents procedències en certes condicions i en petits nuclis de població. Això es deu als seus baixos costos d'explotació i manteniment, a la simplicitat de disseny i a la qualitat que s'obté de l'aigua tractada.

La depuració de l'aigua en els sistemes naturals d'aiguamolls construïts és el resultat de la combinació de diferents processos físics, químics i biològics que es donen a l'interior del mateix.

Existeixen diferents tipus d'aiguamolls construïts segons el tractament a realitzar, el rendiment que se n'espera i les càrregues orgànica i hidràulica a tractar. Aquest estudi se centra exclusivament en els aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal. Aquests, consisteixen en canals o basses impermeabilitzades, reblertes d'un material filtrant (grava) i plantats amb vegetals propis de zones humides (canyís generalment), per on l'aigua discorre subsuperficialment d'un extrem a l'altre. Tot i ser molt efectius en el tractament de l'aigua, poden presentar problemes en el seu correcte funcionament a causa de certs inconvenients que requereixen d'estudi per tal de poder ser mitigats. La colmatació progressiva del material granular de que es componen els aiguamolls és un dels principals problemes (Pedescoll et al., 2009) i és en el que es centra el present estudi.

La colmatació és la pèrdua de volum de porus entre partícules del material granular, que impedeix la correcta circulació de l'aigua a través seu. Es deu, bàsicament, a l'acumulació de sòlids, al creixement de la bio pel·lícula microbiana i a la precipitació química entre d'altres processos.

El material causant de la colmatació és el que s'anomena fang de l'aiguamoll o sòlids retinguts a l'aiguamoll. La naturalesa d'aquest fang pot venir donada tant pels sòlids d'entrada amb l'aigua residual a l'aiguamoll com per aportacions internes (creixement de biopel·lícula, deposició de detritus de plantes o inclús per disgregació del material granular filtrant del mateix).

Si el grau d'obturació és important, es redueix la vida útil de l'aiguamoll, així com la seva capacitat per a desenvolupar correctament les funcions per les quals ha estat dissenyat. La colmatació del material granular provoca un increment del flux superficial de l'aigua, fet que redueix el temps de residència, la filtració i, en conseqüència, l'efectivitat del tractament (Sanford et al., 1995; Cooper et al., 2005).

Els criteris per escollir el material filtrant dels aiguamolls es basen generalment en l'anàlisi de la seva granulometria i la seva forma, però no en la seva composició mineral, fet que podria tenir incidència en la colmatació dels aiguamolls.

Per a poder millorar el coneixement sobre el funcionament hidràulic dels aiguamolls construïts i entendre els processos que intervenen en la colmatació, el seu desenvolupament amb el temps i la seva distribució espacial, des de l'any 2005, s'han dut a terme diverses campanyes de camp en diferents aiguamolls de Catalunya, englobats dins el Projecte NEWWET, finançat pel Ministeri d'Educació i Ciència (CTM2005-06457). En aquestes s'han mesurat diferents aspectes relacionats amb la colmatació, com ara la conductivitat hidràulica i porositat del medi o l'acumulació de sòlids en aquests sistemes. Tots aquests paràmetres són indicadors de la colmatació tot i què difícilment es troben relacions directes entre ells.



## 2. Objectius

### 2.1. Principal

Estudiar la colmatació en 2 aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal construïts a escala real, utilitzats per a la depuració d'aigües residuals urbanes, mitjançant l'acumulació de sòlids com a indicador de la colmatació.

### 2.2. Específics

- Estudiar la distribució espacial de l'acumulació de sòlids.
- Avaluar la naturalesa dels sòlids que produeixen colmatació.
- Comparar la relació entre l'acumulació i naturalesa dels sòlids acumulats amb la configuració de cadascuna de les plantes de tractament estudiades.
- Estudiar la possible influència de la degradació química i mecànica del tipus de grava en la colmatació.



### 3. Revisió bibliogràfica

#### 3.1. Aiguamolls construïts per al tractament d'aigües residuals urbanes

L'inici de la utilització d'aiguamolls per al tractament d'aigües residuals es remunta a la dècada de 1970. En aquest període, investigadors dels Estats Units i científics alemanys es van adonar de la capacitat d'eliminar certs elements químics que presenten els aiguamolls naturals (Mitsch and Gosselink, 2000). Abans d'això, els estudis en aiguamolls s'havien centrat principalment en la propietat d'aquests de generar combustibles fòssils (Kadlec and Wallace, 2008).

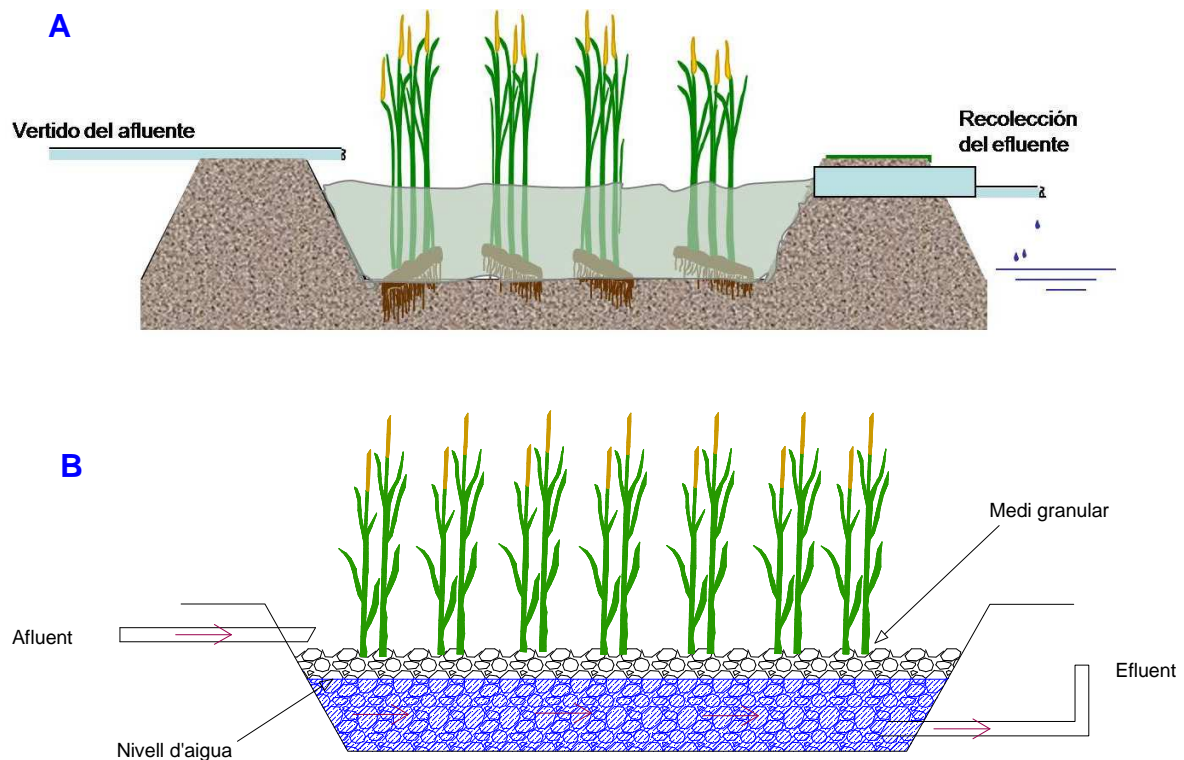
En el darrer quart de segle s'han anat implantant els aiguamolls construïts (AC) per al tractament d'aigües residuals de petites poblacions de Catalunya (García, 2004; Puigagut et al., 2007). Aquests sistemes extensius permeten millorar la qualitat de l'aigua per mitjà d'una sèrie de processos químics, físics i biològics que tenen lloc al seu interior.

Existeixen diverses classificacions que fan referència als aiguamolls per al tractament d'aigües. Una d'aquestes classificacions els divideix en aiguamolls naturals i aiguamolls construïts (AC). Els primers són aiguamolls d'origen no antròpic en els quals s'introdueix l'aigua a tractar i s'espera a que el propi sistema en millori la qualitat sense cap intervenció externa. La seva utilització, no obstant, està molt limitada per regulacions que afecten els ecosistemes dels propis aiguamolls (Mitsch and Gosselink, 2000). Els AC, en canvi, són d'origen antròpic i se'n poden distingir dos tipus segons si el flux d'aigua és superficial o pel contrari l'aigua circula de manera subsuperficial. Dins dels de flux subsuperficial, a més, n'existeixen dues variants, els de flux horitzontal, en els que s'entra una mica més en detall en aquest estudi, i els de flux vertical (Kadlec and Wallace, 2008).

Els aiguamolls de flux superficial es basen en fer circular l'aigua en làmina lliure sense infiltrar-se en cap material granular sinó, simplement, fent-la circular per entremig de vegetació plantada, tal i com s'observa a la figura 3.1.1.A. La depuració de l'aigua es duu a terme a través de la vegetació, els microorganismes i la fauna. Aquest tipus d'aiguamolls es poden entendre com a una modificació del llacunatge natural amb una profunditat de làmina d'aigua entre 0,3 i 0,4 metres i amb vegetació plantada.

### 3. Revisió bibliogràfica

Solen ser usats per a millorar la qualitat d'efluents tractats prèviament en plantes depuradores (García and Corzo, 2008).



**Figura 3.1.1.** Esquema d'un aiguamoll construït de flux superficial (García and Corzo, 2008) a la figura A i esquema d'un aiguamoll construït de flux subsuperficial horitzontal a la figura B.

#### 3.2. Aiguamolls construïts de flux subsuperficial horitzontal (SSF: subsurface flow)

En els aiguamolls de flux subsuperficial, la circulació de l'aigua es duu a terme a través d'un medi granular i en contacte amb les plantes plantades, els microorganismes i la bio pel·lícula que creix adherida al medi granular i a les plantes. La profunditat de la làmina d'aigua sol ser de 0,3 metres (En els de flux subsuperficial vertical la profunditat sol ser d'uns 0,9 metres) (García and Corzo, 2008).

Els aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal són sistemes extensius utilitzats habitualment per al tractament d'aigües que poden presentar orígens diversos. La idea en què es basen aquest tipus de plantes de tractament és en millorar la qualitat de l'aigua a través d'una sèrie de processos químics, físics i biològics que tenen lloc quan l'aigua entra en contacte amb el material granular i amb els rizomes i les arrels de les

plantes (Kadlec and Watson, 1993). Des que l'aigua entra a l'aiguamoll fins que surt, aquesta perd gran part del material en suspensió i dels contaminants inicials.

Entre la grava col·locada i el sòl, s'introdueix una membrana impermeabilitzant per tal d'evitar l'intercanvi d'aigua entre els dos medis. Aquesta membrana sol estar formada per làmines sintètiques de cautxú EPDM, PVC o polietilè d'alta densitat o bé es pot optar per materials argilosos si es troba algun jaciment proper a l'obra (García and Corzo, 2008), que es caracteritzen per tenir una permeabilitat generalment inferior a 5-10 m/s. Degut que el material granular en ocasions pot ser angulós, la malla d'impermeabilització es recobreix, tan per la seva part inferior com per la superior, amb una capa de geotèxtil, per tal d'evitar-ne la perforació.

El nivell d'aigua a l'interior de la grava es manté normalment entre 5 i 15 cm per sota la superfície de manera que el material granular per sota d'aquest marge es trobi permanentment inundat.

L'entrada i sortida de l'aigua al sistema s'ha de dissenyar acuradament, ja que el seu bon funcionament és indispensable per a treure el màxim rendiment del conjunt (Griffin et al., 2008). L'entrada de l'aigua es pot fer de diverses maneres. El procediment que s'utilitza més habitualment consta d'un sistema de canonades que condueixen el flux d'aigua a tractar fins a un canal anivellat, que ocupa tota l'amplada de la secció inicial i que disposa de diversos sobreeixidors per on l'aigua entra a l'aiguamoll (Figura 3.2.1). Aquest canal ha de ser totalment horitzontal per tal de garantir la repartició homogènia de l'aigua en tot l'ample de l'aiguamoll. De no ser així es poden crear zones amb flux preferencial. En ocasions, el canal és substituït per un tub perforat a través del qual l'aigua entra a l'aiguamoll. Aquest sistema presenta l'inconvenient que, els forats del tub, amb el temps, acumulen quantitats importants de residus i perden funcionalitat (Figura 3.2.2). La grava a l'entrada de l'aiguamoll (Figura 3.2.1) sol tenir una granulometria major que la del cos de l'aiguamoll, ja que en aquesta zona és on es diposita la major part de matèria particulada continguda a l'aigua.



**Figura 3.2.1.** Sistema habitual d'entrada d'aigua als aiguamolls, format pel canal de distribució (esquerra) i els sobreexidors (dreta).



**Figura 3.2.2.** Sistema d'entrada d'aigua amb tub perforat. S'observa l'acumulació sòlids impedit la correcta distribució de l'aigua.

Un altre punt crític en el disseny d'un aiguamoll és el sistema de recollida de l'aigua ja tractada. El sistema que s'utilitza més habitualment es compon d'un dren, consistent en un tub perforat que recorre tot l'ample de la secció final de l'aiguamoll recolzat a la seva base. Aquest es connecta a una canonada regulable en alçada que n'evacua l'aigua recollida (Figura 3.2.3). Aquesta canonada és la que permet controlar el nivell de l'aigua dins l'aiguamoll, mitjançant una cadena amb la qual se n'eleva o disminueix l'alçada. La grava que envolta el dren també sol ser d'una mida superior a la resta, ja que cal garantir que l'evacuació de l'aigua es faci sense obstruccions.





**Figura 3.2.3.** Canonada d'extracció d'aigua dels aiguamolls.

Per maximitzar l'eficiència dels aiguamolls, es planten macròfits emergents típics de zones humides com són el canyís<sup>1</sup>, la boga<sup>2</sup> (Figura 3.2.4) i els joncs<sup>3</sup> (García and Corzo, 2008). Les arrels d'aquestes plantes proporcionen unes condicions idònies per al creixement de la bio pel·lícula que, com es descriurà més endavant, compleix un paper essencial en la depuració de les aigües. Les plantes, entre d'altres coses, contribueixen a reduir les puntes de temperatura, ja que en les hores de màxima insolació redueixen l'arribada de la llum directa al medi i quan fa fred extrem n'eviten la congelació.

Un aspecte físic important dels macròfits en el tractament d'aigües residuals mitjançant aiguamolls construïts és que permeten tenir major control de l'erosió del medi i permeten una millor filtració de l'aigua pel medi filtrant (Brix, 1997).

---

<sup>1</sup> *Phragmites australis*

<sup>2</sup> *Typha sp*

<sup>3</sup> *Scirpus sp*



**Figura 3.2.4.** Canyís, boga i jonc.

Les principals diferències entre els sistemes de flux subsuperficial respecte als de flux superficial són que tenen major capacitat de tractament ja que admeten major càrrega orgànica, tenen un baix risc de contacte de l'aigua amb les persones així com de l'aparició d'insectes i, tenen una menor utilitat per a projectes de restauració ambiental degut a la falta de làmina d'aigua accessible (García and Corzo, 2008).

En el present estudi, s'han escollit dos aiguamolls construïts de flux subsuperficial horitzontal a Catalunya, de diferents edats i materials granulars degut a que la majoria d'aiguamolls a Catalunya presenten aquest esquema. Aquests aiguamolls són els de Gualba i Arnes, els quals es descriuen a l'apartat 4.1.

#### 3.2.1. Eliminació de contaminants

Dins els aiguamolls es donen una sèrie de processos i reaccions químiques que els fan idonis per tractar aigües de diferents orígens. Entre d'altres, els processos de més pes són l'eliminació de matèria orgànica, matèria en suspensió, nitrogen, fòsfor i organismes patògens.

La fracció particulada de la matèria orgànica és retinguda a prop de l'entrada de l'aiguamoll entre les partícules de material granular per un procés de filtració. Aquí és transformada en partícules de mida inferior per fragmentació abiòtica i hidrolitzada donant com a resultat la formació de substrats senzills (com glucosa o aminoàcids) que poden ser assimilats directament, sense necessitat d'hidròlisi prèvia (García and Corzo, 2008).



La degradació de la matèria orgànica per activitat microbiana (aeròbia), té lloc a prop de la superfície de l'aigua i en les zones properes a les arrels; zones on hi ha més disponibilitat d'oxigen. La degradació de matèria orgànica per aquesta via consumeix l'oxigen dissolt i de resultes es generen ambients anòxics tot i que són de poca importància.

També s'ha de considerar l'activitat de cucs i fongs que actuen com a digestors d'una petita fracció de la matèria orgànica present dins els llits dels aiguamolls.

Una de les característiques principals dels AC de flux subsuperficial és la gran capacitat d'eliminació de matèria en suspensió. Aquesta eliminació es dona a l'entrada dels aiguamolls i és resultat de la baixa velocitat del flux dins l'aiguamoll i la filtració a través del material filtrant. Per a evitar l'excessiva acumulació de matèria en suspensió entre el material granular de l'aiguamoll s'introdueix, en molts casos, un pretractament.

El principal mecanisme d'eliminació del nitrogen és de tipus microbià degut als processos de nitrificació i desnitrificació que, combinats, donen lloc a nitrogen gas (60%). L'eliminació de l'amoni es produeix també, en menor proporció, per adsorció i absorció per part de les plantes (20%).

Els aiguamolls construïts eliminen tan sols entre un 10% i un 20% del fòsfor present a l'aigua afluent. L'eliminació es produeix per assimilació de les plantes i els microorganismes i per adsorció per part del medi granular. No obstant, l'adsorció en aquests sistemes va disminuint amb el pas del temps.

La reducció de patògens es deu a l'existència d'unes condicions químiques dins els aiguamolls que els són desfavorables (Kadlec and Knight, 1996). L'eliminació de microorganismes també depèn en gran mesura del temps de permanència de l'aigua dins l'aiguamoll així com de les característiques del medi granular. S'ha observat que mides inferiors del material granular augmenten l'eficiència d'eliminació dels microorganismes (García et al., 2003) i que la presència de plantes augmenta l'eliminació de patògens (Solo et al., 1999)

El grau d'eliminació dels microorganismes de la contaminació fecal en sistemes horitzontals oscil·la entre 1 i 2 unitats logarítmiques per cada 100 ml. Això generalment resulta en concentracions no aptes per a usos agrícoles.

#### 3.3. La colmatació (clogging)

En el període inicial de funcionament dels aiguamolls construïts de flux subsuperficial és quan es comencen a desenvolupar una sèrie de processos de naturalesa diversa, que fan disminuir notablement la porositat del material granular (Kadlec and Wallace, 2008) tot i que els aiguamolls comptin i hagin estat dissenyats amb unes propietats hidràuliques determinades que són les òptimes. La disminució de la porositat sol ser molt evident a la zona pròxima a l'entrada de l'aigua a l'aiguamoll (Pedescoll et al., 2009; Drury and Mainzhausen, 2000), mentre que a les zones més allunyades la pèrdua de propietats hidràuliques no és tan acusada tot i que també s'hi dona. Aquest fenomen de reducció de la porositat del medi granular en aiguamolls de flux subsuperficial es coneix amb el nom de colmatació; terme provinent de la paraula en anglès *clogging*.

Així doncs, la colmatació dificulta la circulació de l'aigua donant lloc a la producció d'un increment del flux superficial de manera gairebé inevitable (Figura 3.3.1), fet que redueix l'eficàcia del tractament. A la vegada també es generen zones de flux preferencial que redueixen el temps de residència de l'aigua dins l'aiguamoll i, per tant, les característiques de l'aigua depurada resultant són més desfavorables (Caselles-Osorio et al., 2007). S'ha comprovat, però, que els buidats intermitents dels aiguamolls poden solucionar temporalment el problema. No obstant, a llarg termini no és una mesura efectiva (García and Corzo, 2008).



**Figura 3.3.1.** Circulació de flux superficial degut a la colmatació del material granular.

### 3.3.1. Processos causants de la colmatació

Els diferents processos que causen la colmatació tenen orígens físics, químics i biològics:

#### Processos físics

La deposició de sòlids inerts suspesos a l'aigua afluent, l'acumulació de matèria orgànica refractària<sup>4</sup> i el rentat i deposició de fins i pols del material granular produeixen colmatació (Kadlec and Wallace, 2008).

Degut a que dins l'aiguamoll la velocitat de l'aigua és baixa, la concentració de sòlids en suspensió que entren amb l'afluent, exceptuant els fins del material granular, i la matèria orgànica refractària sedimenten a la zona més propera a l'entrada de l'aiguamoll (aproximadament en el primer 5% de la longitud de l'aiguamoll) (Kadlec and Wallace, 2008).

---

<sup>4</sup> Matèria orgànica difícilment biodegradable

#### Processos químics

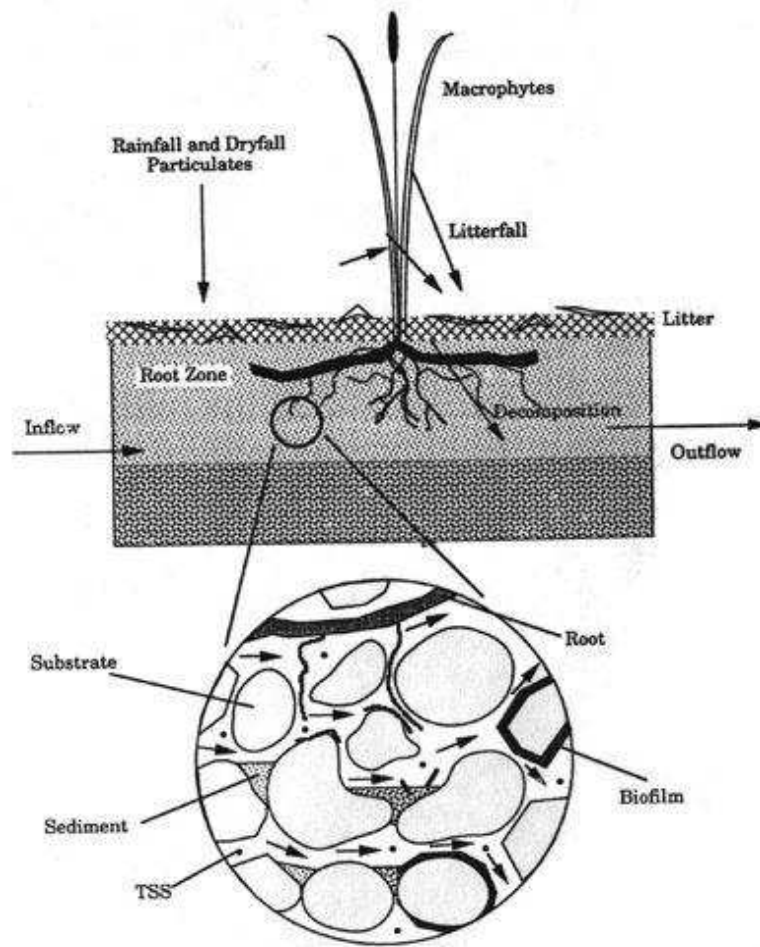
La colmatació química es produeix essencialment per deposició de precipitats químics al llit de l'aiguamoll. Les reaccions químiques que es produeixen dins els aiguamolls de flux subsuperficial resulta en ocasions en la formació de precipitats químics insolubles.

#### Processos biològics (Figura 3.3.1.1)

El principal agent causant de la colmatació d'origen biològic és el degut al desenvolupament de xarxes d'arrels i rizomes de les plantes dins l'aiguamoll. La presència d'arrels es concentra a la capa superior del material granular, de manera que es poden generar zones amb flux preferencial a la part inferior dels llits de grava. La caiguda de fulles de les plantes presents als aiguamolls també redueix la infiltració de l'aigua entrant.

A la vegada, la càrrega de matèria orgànica (tan suspesa com dissolta) estimula el creixement de bio pel·lícula microbiana a sobre del material granular. Aquesta, forma unes estructures que redueixen el volum dels porus i produeixen la dispersió del flux d'aigua. La bio pel·lícula es presenta en dues formes diferents. La primera consisteix en una bio pel·lícula contínua que cobreix uniformement les parets de cada porus, mentre que la segona està formada per microcolònies que colmaten la totalitat del porus. Els microporus, per la seva mida més reduïda són més propensos a colmatar-se totalment que no pas els porus de mides superiors.

La bio pel·lícula, al seu torn, atrapa tan sòlids orgànics com inorgànics (Winter and Goetz, 2003), formant el que es coneix com a biomat. La formació de la bio pel·lícula i el biomat és major a les seccions properes a l'entrada de l'aigua, degut a que la càrrega orgànica en aquesta zona és més elevada que en cap altra. A la sortida, on no hi ha tanta matèria orgànica disponible per als microbis, la formació de biomat és gairebé nul·la.



**Figura 3.3.1.1.** Imatge de detall de l'interior del material granular. S'hi observa la influència de les arrels i la bio pel·lícula (biofilm) en la reducció de la porositat (Kadlec and Knight, 1996).

### 3.3.2. Distribució espacial

Tal i com s'explica anteriorment, la major part dels processos que causen colmatació es produeixen a l'entrada de l'aiguamoll. És per això que gran part dels aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal en operació té flux superficial en alguna zona propera a l'entrada de l'aigua. El creixement de les plantes i la precipitació mineral es produeixen en iguals proporcions independentment de la zona. No obstant, la distribució no uniforme d'arrels i biomat a la superfície dels aiguamolls resulta en una distribució no uniforme de la colmatació en la seva extensió (Kadlec and Wallace, 2008).

A les seccions intermèdies dels aiguamolls poden desenvolupar-se també trams amb un grau de colmatació superior a la resta. Això és degut a l'existència de zones de flux preferencial, generalment motivades per un mal funcionament dels sistemes de repartició i recollida de l'aigua, per l'existència d'arrels a la capa superficial o

simplement perquè l'aigua va canviant de recorregut quan un sector de la grava està molt colmatat.

El desenvolupament de crostes de fang superficial en el tram inicial de l'aiguamoll, generalment a les èpoques amb més insolació, eviten la percolació de l'aigua i, degut a això, la circulació subsuperficial en aquesta zona es veu reduïda. Amb el pas del temps, si no es fa el manteniment adequat i s'eliminen aquestes crostes, es pot iniciar la colmatació de les zones on acaba la crosta, que coincideix amb el punt on l'aigua entrarà a la grava i dipositarà el material particulat que conté (Kadlec and Knight, 1996).

#### 3.3.3. Evolució temporal

La colmatació en aiguamolls construïts és un procés que evoluciona amb el pas del temps i hi ha processos que tenen més importància en la colmatació a curt termini, com per exemple la formació del biomat i el creixement d'arrels (Kadlec and Wallace, 2008), mentre que n'hi ha d'altres que tenen més pes a llarg termini, com poden ser la formació de precipitats químics insolubles, la deposició de sòlids inerts en suspensió i l'acumulació de matèria orgànica refractària. D'aquesta manera, la major pèrdua de porositat es produeix durant el primer any de funcionament de l'aiguamoll, ja que aquest és el període en el qual es desenvolupen les xarxes d'arrels de les plantes i la bio pel·lícula.

És fàcil pensar que l'evolució de la bio pel·lícula amb el temps podria arribar a obstruir per complet la porositat, però en realitat, amb l'envelliment, la bio pel·lícula esdevé més fina degut al balanç entre el creixement biològic i la mort bacteriana i també a la reducció del transport de substrat (Okabe et al., 1998). L'aigua i els nutrients són els principals limitadors del creixement i manteniment de la bio pel·lícula.

#### 3.3.4. Mesura de la colmatació

Una manera molt directa i visual d'esbrinar si un aiguamoll està colmatat és la presència de tolls d'aigua. Aquest aspecte ve provocat pel fenomen explicat anteriorment de que si els porus estan colmatats l'aigua flueix de manera superficial dins l'aiguamoll. Així doncs, amb aquest aspecte podem saber si l'aiguamoll està colmatat de manera visual però alhora, hi ha diferents mètodes per estudiar el grau de colmatació.

Una manera d'estudiar la colmatació és mitjançant la conductivitat hidràulica, que és la velocitat d'infiltració de l'aigua a través d'un medi. A grans trets, ens indica que a major conductivitat hidràulica menor és la colmatació. El grau de colmatació és funció del valor de conductivitat (Pedescoll et al, 2009, Knowles et al, 2009).

Amb l'ús de traçadors també podem estudiar la colmatació ja que, amb aquests, podem veure la velocitat a la que circula l'aigua dins l'aiguamoll, la trajectòria de les partícules en planta, i diferents paràmetres que ens donaran indicacions de fluxes preferencials (Bowmer, K., 1986).

Amb la porositat efectiva també es pot saber si un aiguamoll està colmatat o no. L'acumulació o retenció de sòlids entre les partícules del material filtrant fa que la porositat disminueixi; de manera que, una porositat és més baixa que la teòrica del medi granular indica acumulació de matèria retinguda i, per tant, possible colmatació.

Un altre indicador de la colmatació, base d'aquest estudi, és l'acumulació de sòlids (Caselles-Orsorio et al., 2007). Com ja s'ha dit, els sòlids presents a l'aiguamoll, ja provinquin de la grava del mateix o de l'aigua afluent, es van acumulant dins l'aiguamoll degut a la baixa velocitat de l'aigua dins seu, a la mida dels sòlids o a la mida de porus.

#### 3.3.5. Material granular

Una de les causes de l'acumulació de sòlids és el propi material filtrant. L'origen d'aquest incideix directament en la colmatació de l'aiguamoll; és a dir, si l'aiguamoll té un material filtrant que es degrada fàcilment, la fracció de sòlid que es vagi desprenent, circularà amb l'aigua i, d'igual manera que els sòlids que provenen de l'aigua afluent, s'anirà dipositant a l'aiguamoll per sedimentació o per retenció.

Pedescoll et al, (2009) estudiaren l'acumulació de sòlids en dos aiguamolls construïts de flux subsuperficial horitzontal i veieren que aproximadament un 80 % dels sòlids acumulats eren de naturalesa inorgànica i amb la mateixa composició mineral que la grava de que es composava el material filtrant de l'aiguamoll.

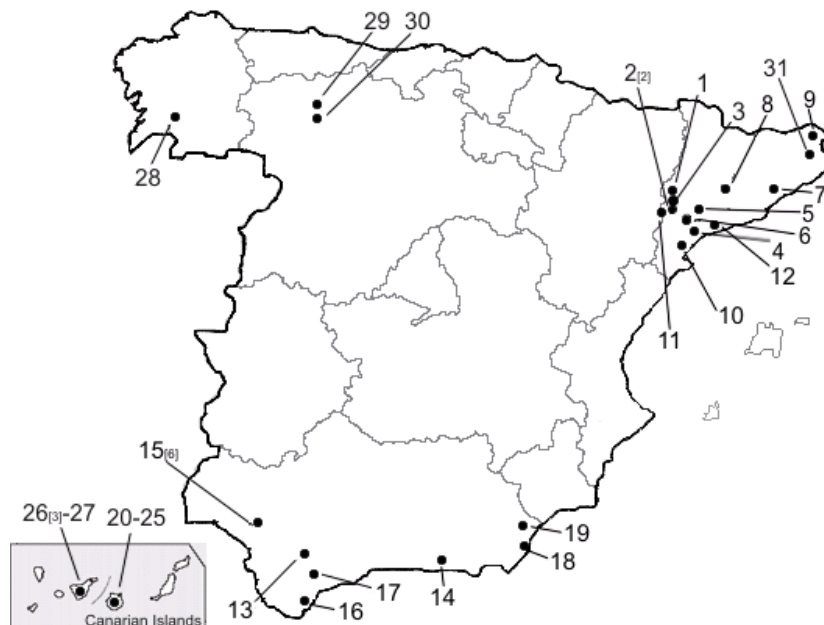
Aquesta degradabilitat, a més, incrementa amb el temps ja que, ja sigui per degradació mecànica o química, quant més temps estigui la grava dins l'aiguamoll, més temps haurà tingut per degradar-se.



## 4. Materials i mètodes

### 4.1. Descripció de les plantes d'estudi

Les campanyes de camp realitzades s'emplanten en dos sistemes d'aiguamolls construïts a Catalunya: Gualba (Vallès Oriental) i Arnes (Terra Alta). Es va optar per aquests dos en concret entre els 13 que hi ha repartits a Catalunya (veure Figura 4.1.1.), per la seva edat i el seu estat de maduració, ja que l'aiguamoll de Gualba és un aiguamoll jove, degut que s'ha substituït la meitat de la grava recentment (gener de 2008), mentre que el d'Arnes porta 10 anys en funcionament sense cap canvi de grava i, per tant, es considera un sistema madur.



**Figura 4.1.1.** Localització de sistemes de tractament amb aiguamolls construïts a Espanya (entre parèntesi hi ha el número de sistemes en determinades localitats). Catalunya: [1] Corbins, [2] Almatret, [3] Alfés, [4] El Masroig, [5] Verdú, [6] La Fatarella, [7] Gualba, [8] St. Martí de Sesgueioles, [9] Vilajuïga, [10] Arnes, [11] Pobla de Massalua, [12] Vilaplana, [31] Cervià de Ter. (Puigagut *et al.*, 2007).

Els mostrejos van consistir en 3 visites per aiguamoll en dies no consecutius. En la primera visita a cada aiguamoll es van fer mesures de conductivitat hidràulica en una xarxa de punts equidistants i en les successives visites es va procedir a la recollida de mostres de grava de diferents punts dels quals es coneixia la conductivitat. Cada mostra va consistir en un volum aproximadament d'un litre de material granular i es recollia a l'alçada a la qual es trobava el nivell d'aigua.

##### 4.1.1. Gualba

La primera planta que es va visitar està situada al sud del municipi de Gualba (figura 4.1.1.1) i tracta les aigües provinents d'aquesta localitat. Es va posar en funcionament l'any 2002, però al gener de 2008 se'n va renovar parcialment el material granular. Aquesta planta va ser dissenyada per tractar un cabal de  $207 \text{ m}^3/\text{dia}$  corresponents a 1037 hab-eq., amb una càrrega orgànica d'entrada de  $32 \text{ gDBO}/\text{m}^2/\text{dia}$  i una càrrega de sòlids de  $42 \text{ gTSS}/\text{m}^2/\text{dia}$ . El conjunt de la planta consta d'un pretractament amb rototamís a continuació del qual l'aigua es fa passar a través de dos aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal els quals sumen una superfície total de  $2808 \text{ m}^2$ . Aquests poden funcionar en paral·lel o en sèrie segons la qualitat de l'efluent obtinguda. La repartició del flux als dos aiguamolls es pot controlar amb unes vàlvules en una arqueta situada entremig dels dos aiguamolls.



**Figura 4.1.1.1.** Localització geogràfica de la planta de tractament d'aigua de Gualba.

En el moment en què es van dur a terme les 3 visites tècniques, el segon aiguamoll estava força colmatat, per la qual cosa es va optar per no fer cap assaig. Degut al baix rendiment d'aquest llit, els dos aiguamolls es feien funcionar en sèrie. El primer aiguamoll de la sèrie, en el qual s'ha realitzat la presa de mostres, té una

longitud de 27 m i una amplada de 52 m. El fons està cobert per una membrana plàstica d'impermeabilització que impedeix l'intercanvi d'aigua entre el sòl i el sistema de tractament. El gruix de grava és d'uns 50 cm en tota la seva extensió. Els primers dos metres de l'aiguamoll, així com els dos últims, estan constituïts d'una grava de mida grollera. La resta de grava és de granulometria més fina i granítica en la seva composició mineral. L'aiguamoll està plantat amb diverses files de canyís en tota la seva longitud, exceptuant els 2 primers i els 2 últims metres, que es mantenen sense vegetació. Com ja s'ha esmentat anteriorment, la grava d'aquest segon aiguamoll va ser parcialment substituïda durant el gener de 2008, ja que presentava un grau de colmatació elevat, impeding així el correcte tractament de l'aigua. Concretament, es va substituir la totalitat de la grava (50 cm gruix) dels 8 primers metres de l'entrada, a partir del punt on acaba la grava grollera, així com els 22 cm superficials de la resta de l'aiguamoll. El fet que es reemplaçés la grava només parcialment, es va anar coneixent a mesura que es feien les campanyes de camp i s'analitzaven les mostres al laboratori. Finalment va ser confirmat per part dels explotadors de l'aiguamoll.

L'entrada de l'aigua a l'aiguamoll es fa a través de 4 conductes separats. Aquests provenen de l'arqueta que divideix l'aigua entre els dos aiguamolls i reparteixen l'aigua en punts separats dins d'un canal (Figura 4.1.1.2). Aquest canal consta d'un conjunt de sobreexidors que reparteixen l'aigua uniformement en tota la secció d'entrada de l'aiguamoll. L'aigua efluent es recull amb un tub perforat situat al punt més baix de la secció final de l'aiguamoll i que connecta amb un tub de sortida. Aquest tub permet regular el nivell d'aigua de l'aiguamoll utilitzant una cadena que permet elevar-lo o baixar-lo.



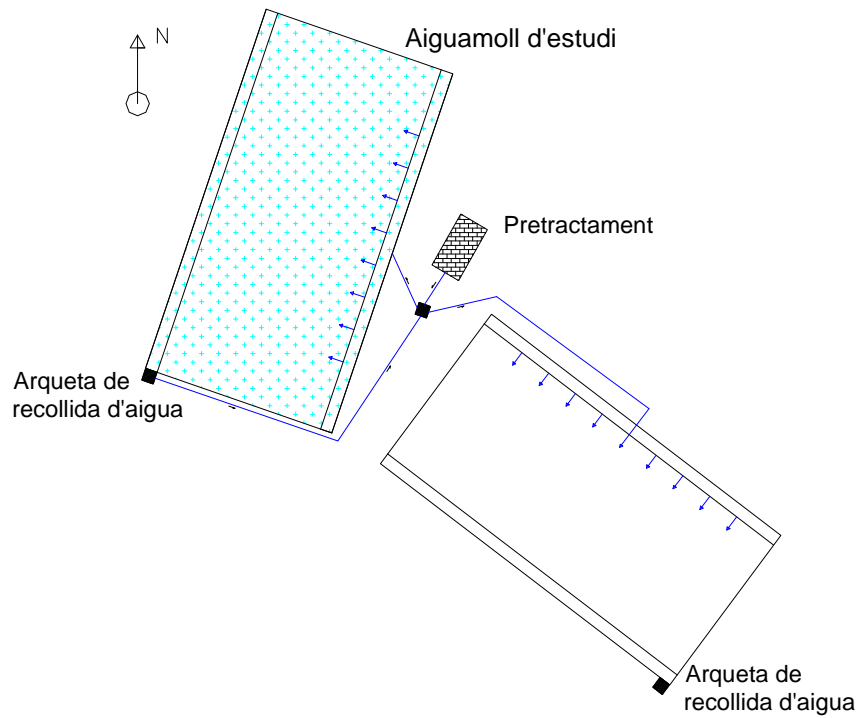


**Figura 4.1.1.2.** Canal d'entrada d'aigua de l'aiguamoll d'estudi de la planta depuradora de Gualba.

Finalment l'aigua ja tractada es fa arribar a la riera de Gualba. En el moment de la primera visita (18 de febrer de 2009), el canyís encara no havia començat a sortir, mentre que en la segona ocasió (26 de febrer de 2009) ja començaven a sortir les primeres tiges. El dia de la última visita (19 de març de 2009), en el qual es va fer la presa de mostres, les plantes ja tenien una alçada aproximada de mig metre.

En la primera visita es va optar per fer 4 rengleres de punts de mostreig (A, B, C i D) separades 10 metres entre sí i cada una d'elles amb 7 punts de mesura de conductivitat hidràulica. Les mesures es van començar a fer 1 metre enllà de la grava grollera i separades cada 3,15 metres aproximadament, a una profunditat de 20 cm. sota el nivell de l'aigua.

### Planta EDAR Gualba



**Figura 4.1.1.3.** Esquema en planta de la EDAR de Gualba.

#### 4.1.2. Arnes

L'estació depuradora d'aigües residuals d'Arnes està situada entre la població l'Hort del Molí i el riu Algars (Figura 4.1.2.1) i va ser inaugurada el 23 de Setembre de 1999.



**Figura 4.1.2.1.** Localització geogràfica de la planta de tractament d'aigua d'Arnes.



#### 4. Materials i mètodes

---

La Planta té una extensió de 3264 m<sup>2</sup> i va ser dissenyada per tractar 324 m<sup>3</sup>/dia de cabal d'aigua residual, corresponents a 1305 hab-eq., una càrrega orgànica de 63 gDBO/m<sup>2</sup>dia i una càrrega de sòlids de 38 gTSS/m<sup>2</sup>dia. La Planta té un pretractament que consisteix en un desbast i un tractament primari consistent en una decantació (Figures 4.1.2.2. i 4.1.2.3.). Seguidament es condueix l'aigua fins a un sistema constituït per dos aiguamolls de flux subsuperficial horitzontal que poden funcionar en sèrie o en paral·lel.



**Figura 4.1.2.2.** Edifici del pretractament i tractament primari d'Arnes.



**Figura 4.1.2.3.** Tractament primari d'Arnes (decantació).

Cadascun dels dos aiguamolls té una longitud de 24 metres i està dividit en 8 compartiments de 8,5 metres d'amplada cadascun, delimitats per murs laterals (Figura 4.1.2.4.). L'aigua entra al sistema a través d'un tub perforat (Figura 4.1.2.5.). Cada un dels aiguamolls individuals compta amb una única sola entrada d'aigua en el punt central de la secció inicial. Una capa d'argila compactada al fons del conjunt d'aiguamolls fa les funcions d'impermeabilització. El nivell d'aigua dins l'aiguamoll es controla com a l'aiguamoll de Gualba per mitjà d'una canonada, l'extrem inferior de la qual es pot regular en alçada. L'aigua es condueix finalment a un aiguamoll de flux superficial on s'hi desenvolupa el tractament terciari.



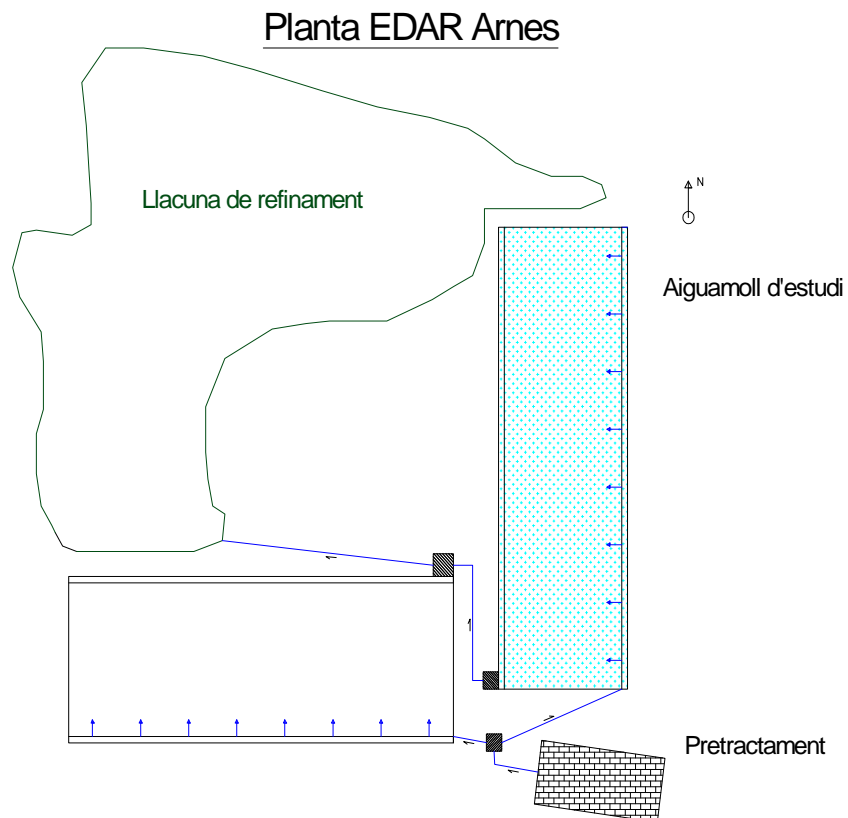
**Figura 4.1.2.4.** Imatge d'un dels dos aiguamolls que componen la planta de tractament d'Arnes. S'hi observen els murs de separació entre parcel·les.





**Figura 4.1.2.5.** Imatge d'un dels dos aiguamolls que componen la planta de tractament d'Arnes. S'hi observen els murs de separació entre parcel·les.

Degut a l'àmplia extensió de l'aiguamoll de flux subsuperficial, es va haver de decidir en quins compartiments s'havien de realitzar els mostrejos. Així doncs, i per tenir una distribució espacial més uniforme, es va decidir fer-los en els compartiments senars (un si un no).



**Figura 4.1.2.6.** Vista en planta de la EDAR d'Arnes.



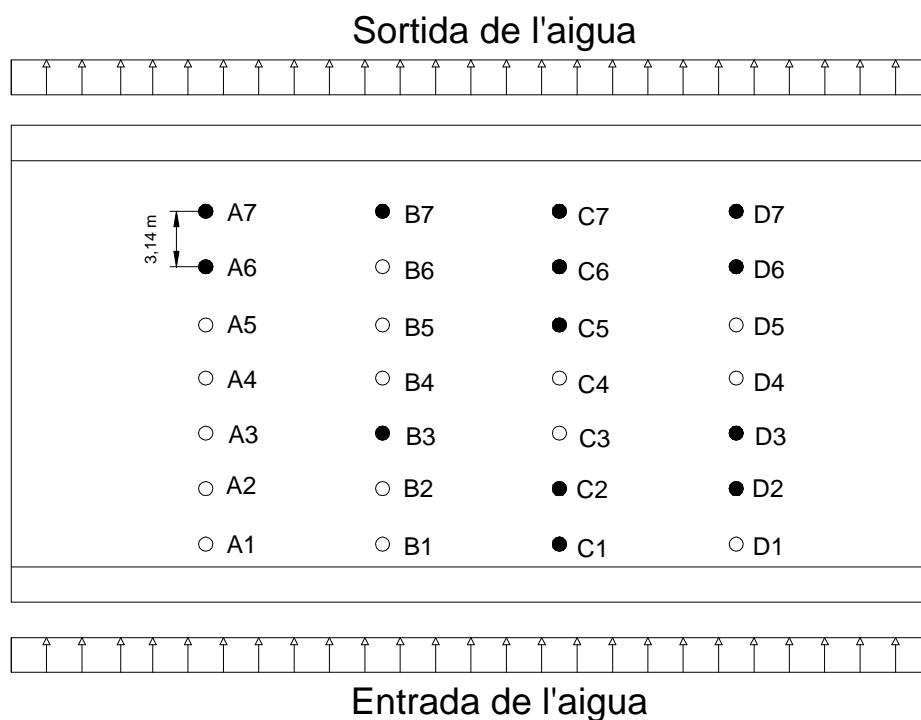
## 4.2. Mostreig

### 4.2.1. Punts de mostreig

Abans de començar el treball de camp, s'ha de fer una planificació per tenir clars els punts de mostreig dels quals es vol realitzar l'anàlisi. En el present estudi, la presa de mostres no s'ha realitzat de manera uniforme a tots els punts on es va calcular la conductivitat, la qual es va mesurar en tots els punts indicats a les figures 4.2.1.1. i 4.2.1.2. (Samsó, R., 2010) degut a que es va veure, amb l'anàlisi d'aquest paràmetre, que no era necessari calcular la quantitat de sòlids en tots els punts sinó només en uns quants d'ells. Aquests punts, són els que presenten algunes de les següents condicions:

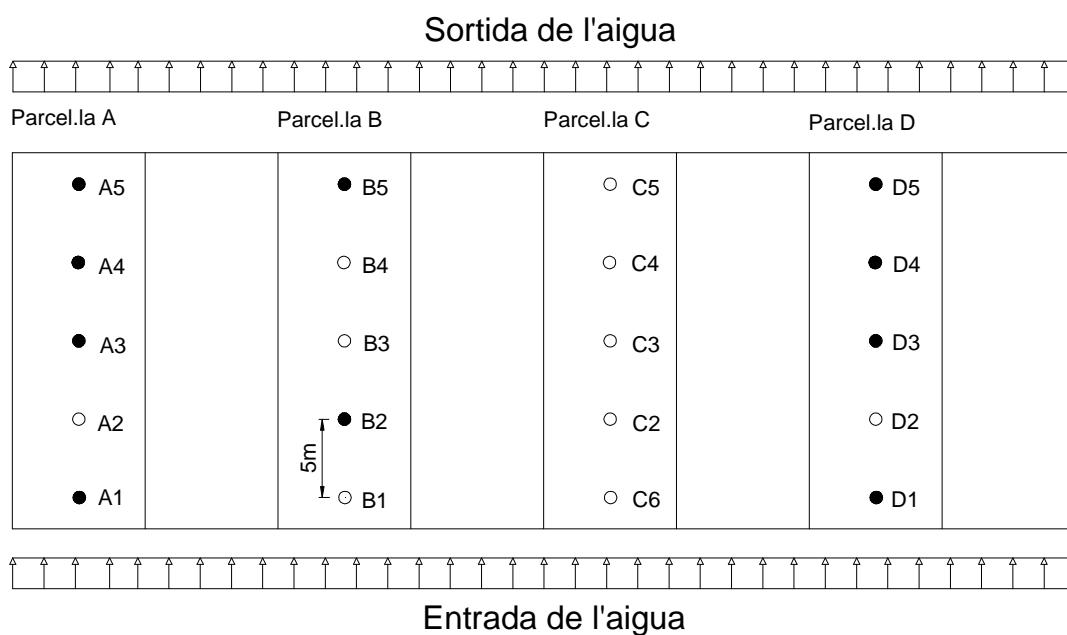
- Punts d'entrada i sortida dels aiguamolls.
- Punts en els que la conductivitat no presenta el valor o la tendència esperats (sigui major o menor).
- Punts de conductivitat baixa; els quals indiquen una colmatació elevada.

Així doncs, els punts mostrejats s'esquematitzen a les següents figures; la primera de l'aiguamoll de Gualba i la segona de l'aiguamoll d'Arnes.



● Punts de mostreig

**Figura 4.2.1.1.** Esquema dels punts analitzats a l'aiguamoll de Gualba.



● Punts de mostreig

**Figura 4.2.1.2.** Esquema dels punts analitzats a l'aiguamoll d'Arnes.

#### 4.2.2. Presa de mostres

Per tenir un bon control de les mostres que es van agafant, s'han etiquetat tots els punts així com els envasos de plàstic d'un litre de volum cadascun en els quals es va

anar recollint tot el material. Després d'això i, equipats amb botes d'aigua i guants, es van anar omplint tots els recipients recollint les mostres amb pales cuidadosament per evitar malmetre el material.

Una vegada recollides les mostres, es van col·locar en neveres de mà per tal de conservar-les el millor possible fins la posterior arribada al laboratori. A l'arribar al laboratori, es van desar totes les mostres a la nevera per mantenir-les a 4°C de conservació. Després del mínim temps possible es va procedir a analitzar-les. Als apartats següents s'explica breument com es van analitzar cadascun dels paràmetres.

#### 4.3. Acumulació de sòlids

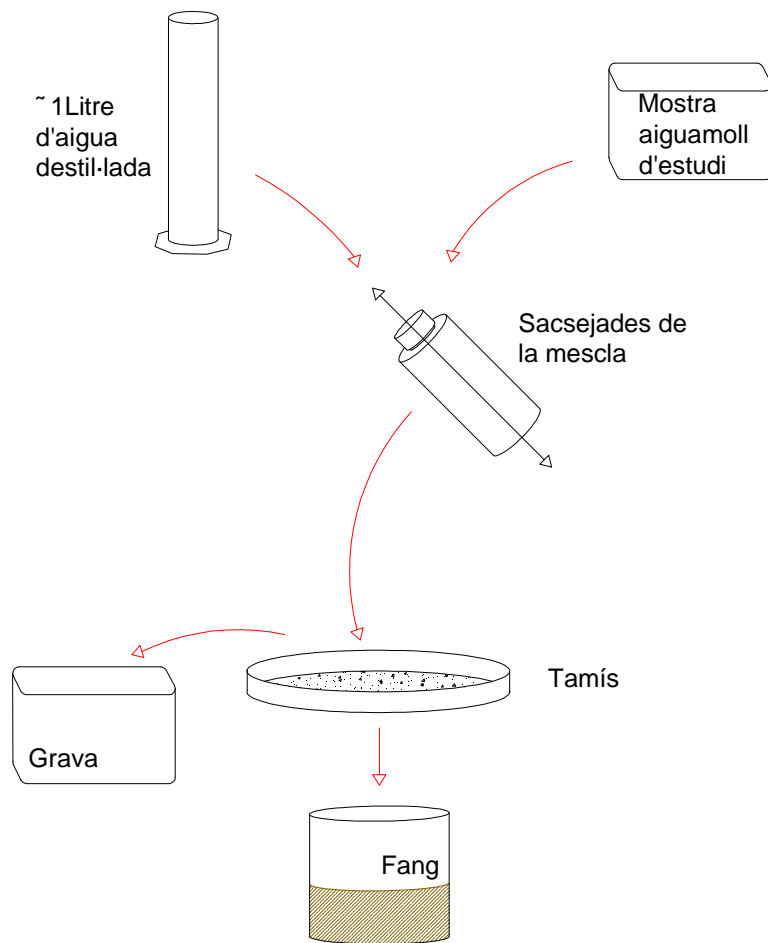
Abans d'analitzar el fang o la grava, aquests s'han de separar entre ells. Aquest procediment consta d'una sèrie de passos, els quals es detallen a continuació.

Primerament s'agafa la mostra i es retiren les arrels i fragments de tiges que ens puguem trobar. A continuació s'aboca tota l'aigua que tinguem a la mostra en un vas de precipitats i es mesura el volum que hi ha. Aquesta mesura és imprescindible perquè, com que treballarem en cada mostra amb un volum total aproximat d'un litre, tot el que falti d'aigua per arribar a aquest litre, l'haurem d'afegir amb aigua destil·lada. Amb aquest total d'un litre s'ha d'aconseguir rentar el més acurat possible la grava de la mostra.

Una vegada tenim l'aigua introduïm, en diferents vegades, fraccions de grava en una pot de plàstic que tanqui hermèticament juntament amb una mica del litre d'aigua. Sacsegem el pot i aboquem l'aigua amb ajuda d'un tamís de pas de 1-1,5 mm a un vas de precipitats d'un litre de capacitat. Continuem introduint aigua fins que la grava sembli neta. Aquest procediment es repeteix amb tota la grava de la mostra.

Una vegada fet això ja tenim per una banda la grava i, per l'altra el fang. Per això, es va necessitar un colador, vasos de precipitats d'un litre de volum, una pala metàl·lica, un pot amb tanca hermètica de plàstic, aigua destil·lada i safates metàl·liques per poder assecar la grava resultant a l'estufa.

Cal dir que tots els anàlisis de sòlids realitzats al fang dels aiguamolls d'estudi, i que s'indiquen a continuació, s'han realitzat segons l'indicat al llibre 'Standard Methods For the Examination of Water and Wastewater' (APHA-AWWA-WPCF, 2001).



**Figura 4.3.1.** Esquema del procés de separació del fang de la grava de les mostres d'estudi (AUTOCAD)

##### 4.3.1. Índex volumètric de fangs (IVF)

L'índex volumètric de fangs és el quocient entre el volum decantat de fang i els sòlids en suspensió totals; tal i com es mostra a la següent fórmula:

$$IVF = \frac{VolumFangDecantat(mL / L) \times 1000}{SST(mg / L)} \quad (1)$$

per això cal saber com es van mesurar ambdós paràmetres al laboratori:

##### Volum de Fang Decantat

Una vegada separada la grava del fang, el litre aproximat de fang es va col·locar a un decantador de forma cònica i es van mesurar els mil·lilitres de fang decantat als 5,

10, 15, 20, 25, 30 minuts i a les 24 hores. La relació entre el volum de fang decantat i el volum total col·locat al con a les 24 hores és el volum de fang decantat en mL/L.

### Sòlids en Suspensió Totals

Amb el fang abans de decantar, es va realitzar la mesura dels sòlids en suspensió totals.

Per fer això es van necessitar filtres de fibra de vidre, bombes succionadores, pipetes, balança de precisió 0,1 mg i recipients metàl·lics per col·locar els filtres i poder-lo posar a l'estufa.

Primerament es van tarar i numerar els filtres. Seguidament es van filtrar entre 1 i 20 mil·lilitres, depenent de la densitat aparent del fang, de cada mostra. Es van realitzar tres repeticions de cada per poder evitar errors grollers. Finalment es van col·locar els filtres a l'estufa per evaporar l'aigua present i es van pesar els filtres amb els sòlids retinguts. La diferència de pesos relacionant-los també amb el volum filtrat resulta en la quantitat de SST del fang:

$$SST(mg / L) = \frac{(A - B) \times 1000}{VolumFiltrat(mL)} \quad (2)$$

on A = Pes del filtre i el residu sòlid retingut (mg)

B = Tara del filtre (mg)

#### 4.3.2. Sòlids totals (ST)

Per al càlcul dels sòlids totals, es necessita el fang decantat. Una vegada teníem el fang decantat, destapant amb compte el con per la part inferior, vam abocar el fang en un recipient de vidre i vam llançar l'aigua dels sobrenedant. amb una xeringa vam agafar entre 1 i 10 mil·límetres de fang i els vam col·locar en cresols prèviament tarats. Vam fer tres repeticions de cada mostra i els vam col·locar a l'estufa. A les 24 hores ja podíem retirar els cresols i tornar-los a pesar. La diferència de pesos en relació al volum utilitzat de fang ens va donar els sòlids totals.

$$ST(mg / L) = \frac{(A - B) \times 1000}{VolumFiltrat(mL)} \quad (3)$$

on A = Pes del cresol i el residu sòlid (mg)

B = Tara del cresol (mg)

##### 4.3.3. Sòlids volàtils (SV)

Els sòlids volàtils es calculen de la mateixa manera que els totals però en comptes de col·locar els cresols a l'estufa es col·loquen a la mufla a 550 °C durant 30 minuts per tal de que la matèria orgànica es volatilitzï. Així doncs, tenim que:

$$SInorg(mg / L) = \frac{(A - B) \times 1000}{VolumFiltrat(mL)} \quad (4)$$

$$SV(mg / L) = ST(mg / L) - SInorg(mg / L) \quad (5)$$

on A = Pes del cresol i el residu sòlid després de la mufla (mg)

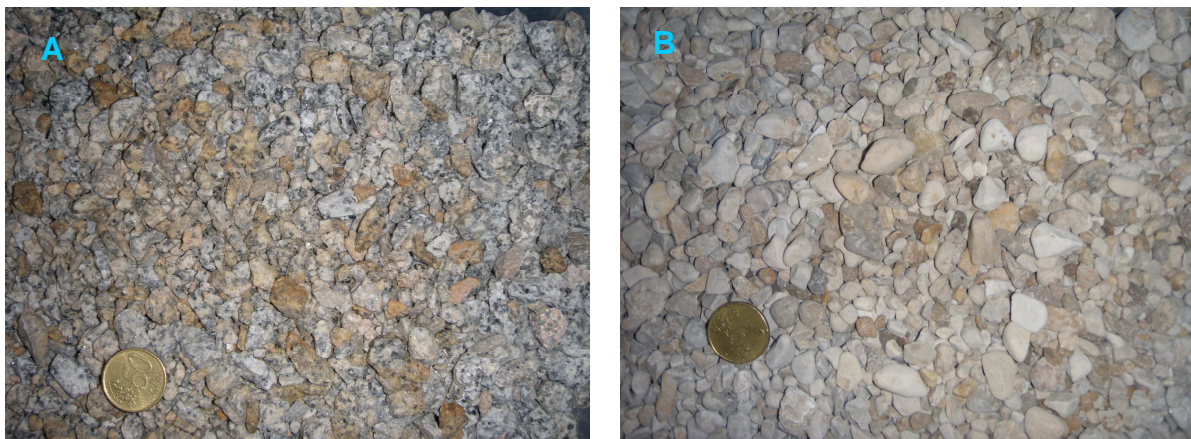
B = Tara cresol

##### 4.4. Anàlisi del material granular

El tipus de material granular del que es compona el llit dels aiguamolls construïts de flux subsuperficial influeix en la colmatació del mateix. Aquesta incidència té major efecte a llarg termini i pot ser deguda tant a degradació mecànica com a degradació química del material. En ambdós processos físics és de gran importància la composició mineral de la grava.

En la taula 9.1. que es mostra a l'annex de taules s'indiquen una sèrie de dades de graves de diferents aiguamolls, a part de Gualba i Arnes. Les dades s'han obtingut d'estudis anteriors i d'anàlisis paral·lels als realitzats a les graves de Gualba i Arnes duts a terme al laboratori del Departament d'Enginyeria Sanitària i Ambiental de la UPC.

A continuació es mostren les imatges de les graves de Gualba i Arnes respectivament per a tenir una idea visual de les seves característiques.



**Figura 4.4.1.** Graves de Gualba (A) i Arnes (B).

#### 4.4.1. Composició mineral

Com ja s'ha comentat, la composició mineral de la grava és important ja que té una influència directa en la degradació. Cada mineral té un grau de resistència de manera que n'hi ha que són més degradables i n'hi ha que ho són menys. Un altre aspecte és que, si una grava està formada per més d'un mineral, segur que és més degradable mecànicament que una altra grava que estigui formada per un únic mineral.

Per poder conèixer de quins minerals es componen les graves dels aiguamolls d'estudi, així com graves d'altres aiguamolls que ens ajudaran a comparar propietats de manera més clara, s'ha realitzat una prospecció de Rajos X de les mostres.

La determinació de la composició mineral d'un àrid s'ha realitzat mitjançant la difracció de rajos X. Aquest mètode consisteix en realitzar una difracció de rajos X entre  $4^{\circ}$  i  $70^{\circ}$  en intervals de  $0,05^{\circ}$  i cada 3 segons a través del material. La mida de l'àrid s'ha hagut de reduir prèviament fins a  $0,063 \mu\text{m}$ . Els resultats obtinguts es representen en unes gràfiques, les quals requereixen de certa interpretació per conèixer quins minerals es representen.

Per poder tractar les mostres mitjançant la difracció de rajos X, prèviament van ser tractades d'acord amb les normes EN-1477-1 (AENOR, 1998a,b) i EN 932-2 (AENOR, 1999).

### 4.4.2. Resistència mecànica

Per determinar la resistència mecànica de les graves s'han realitzat tres assajos de determinació del paràmetre adequats per a graves i sòls.

Els assajos realitzats han estat l'assaig Proctor Normal, l'assaig de Los Angeles i l'assaig per la determinació de la durabilitat a l'esmicolament de les roques toves. Cal dir que els assajos realitzats no s'adapten exactament a les normes. Això és degut a que el material del que es disposa és molt uniforme, a que no es té la quantitat total de grava que en alguns casos seria necessària i a que l'objectiu d'aquests assajos és que ens permetin discutir i comparar les graves d'estudi per tenir un ventall més ample dels aspectes que incideixen en la colmatació.

D'aquesta manera, els assajos es presenten a continuació tal i com s'han realitzat. Aquests assajos segueixen les normes establertes per a cada un d'ells tot i presentar petites diferències.

#### Assaig Proctor Normal

L'assaig Proctor Normal s'ha realitzat seguint la norma UNE 103-500. L'objectiu de la realització d'aquest assaig ha estat el voler comparar les corbes granulomètriques de les graves analitzades abans i després de sotmetre-les a l'assaig.

El motlle utilitzat és cilíndric i metàl·lic, de  $1000 \pm 9 \text{ cm}^3$  de capacitat,  $102 \pm 0,4 \text{ mm}$  de diàmetre interior i  $122,4 \pm 0,1 \text{ mm}$  d'alçada. Disposarà d'un collar del mateix diàmetre i alçada aproximada de 60 mm, per col·locar-lo a la part superior del motlle durant les operacions de piconament. El motlle i el collar estaran construïts de manera que puguin ser subjectats fermament a la base plena metàl·lica desmuntable. La forma del motlle queda descrit visualment a la fotografia que es mostra a continuació (Figura 4.4.2.1.).

La maça és metàl·lica de  $2,5 \pm 0,01 \text{ kg}$ , adaptada a l'interior d'una guia tubular adequada per tal que l'alçada de caiguda lliure sigui de  $305 \pm 2 \text{ mm}$ . La maça serà manual i haurà de tenir un diàmetre de  $50 \pm 0,2 \text{ mm}$  i la guia a disposar; com a mínim de 4 orificis d'1 cm de diàmetre, espaiats  $90^\circ$  i a 2 cm de cada extrem per facilitar la sortida d'aire. La separació entre la maça i la guia ha de ser suficient per tal de que la caiguda sigui lliure.





**Figura 4.4.2.1.** Mottle i maça usats en l'assaig Proctor Normal.

Després de pesar el material i fer-li la granulometria, s'omple el mottle, amb el collar col·locat, amb una quantitat de material tal que ompli aproximadament un 80 % de l'alçada del mottle. La compactació de les capes es realitza mitjançant 26 cops de la maça, distribuïts uniformement en tota la superfície. Després de realitzar l'assaig, s'extreu la mostra i es deixa assecar a l'estufa a  $110 \pm 5$  °C fins a obtenir una massa constant. Finalment es torna a pesar la massa i es realitza novament la granulometria.

L'anàlisi dels resultats d'aquest assaig es fa comparant les corbes granulomètriques i, per tant, analitzant la pèrdua de material a cada tamís.

Per a l'assaig Proctor Normal més àcid, la realització de la part mecànica s'ha realitzat de la mateixa manera recentment presentada.

##### Assaig de Los Angeles

L'assaig de Los Angeles proporciona un coeficient (%) que quantifica la friabilitat d'un material gros. La friabilitat és la facilitat que té el material gros de disgregar-se sota l'acció una pressió.

El mètode consisteix en analitzar granulomètricament un àrid gros, preparar una mostra d'assaig que es sotmet a abrasió a la màquina de Los Angeles i expressar la pèrdua de material o desgast com el percentatge de pèrdua de massa de la mostra amb respecte a la seva massa inicial.



**Figura 4.4.2.2.** Màquina de Los Angeles.

Segons la Norma Espanyola EN 1097-2:1998, l'assaig consisteix en:

La mostra de l'àrid es volteja a l'interior d'un tambor giratori, juntament amb unes boles d'acer. Després del volteig es determina el material retingut al tamís 1,6 mm.

La massa de la mostra ha de ser de  $5000 \pm 5$  grams amb una granulometria compresa entre 14 i 10 mm. A més, la corba granulomètrica haurà de complir alguna de les següents condicions:

- Entre el 60 i el 70 % de l'àrid haurà de passar pel tamís de 12,5 mm.
- Entre el 30 i el 40 % de l'àrid haurà de passar pel tamís de 11,2 mm.

Seguidament es barreja bé la mostra per tal de que tingui una granulometria homogènia.

Amb el tambor net, s'introdueixen les boles i, seguidament la mostra d'assaig. Es tanca el tambor i es fa girar durant 500 voltes, a una velocitat constant entre 31 r.p.m. i 33 r.p.m.

Es deixa caure el material assajat a la safata disposada sota l'equip, vigilant d'evitar qualsevol pèrdua de material. Es neteja el tambor, extraient tots els fins i es retiren amb compte les boles de la safata; evitant perdre partícules d'àrid.

Finalment es tamisa l'àrid obtingut per un tamís de diàmetre 1,6 mm i la fracció retinguda es seca a l'estufa a  $110 \pm 5$  °C fins a obtenir una massa constant. Amb això ja es pot procedir al càlcul del coeficient de Los Angeles:

$$LA = \frac{5000 - m}{50} \quad (6)$$

On m és la massa retinguda pel tamís 1,6 mm, en grams,  
S'anota el resultat arrodonint al nombre enter més proper.

Valors en torn a 20 indiquen que tenim un material resistent al desgast. Valors al voltant de 50, indiquen materials de baixa resistència al desgast. No s'admeten materials de  $L > 35$ . (imagino que per a construcció)

#### Assaig de durabilitat l'esmicolament de les roques toves

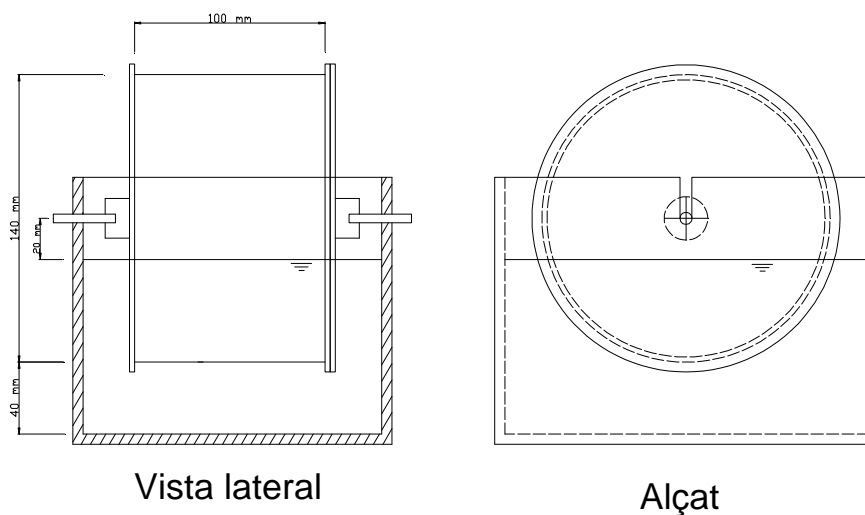
Seguint la norma NLT – 251/91, aquest assaig es realitza per a determinar la resistència d'una mostra de roca a la debilitació i a la desintegració quan es sotmet a dos cicles normalitzats d'humitat - sequedat.

L'aparell usat a l'assaig consisteix en:

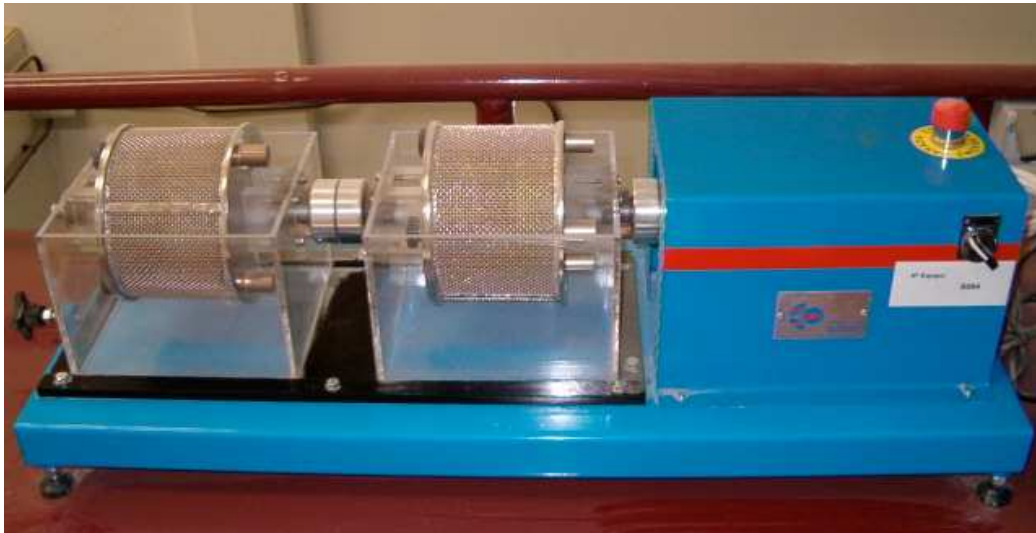
- Un tambor, superfície cilíndrica del qual, està formada per una malla normalitzada amb una obertura de pas de 2 mm, amb una longitud de 100 mm i un diàmetre de 140 mm i una base sòlida fixa. L'altra base del cilindre s'ha de poder obrir per accedir a l'interior del tambor. Ha de poder resistir temperatures

de 105 °C i ser suficientment fort per poder mantenir la seva forma durant la seva utilització.

- Un recipient per contenir el tambor d'assaig, col·locat amb el seu eix horitzontal de forma que li permeti girar lliurement i que pugui omplir-se amb líquid per produir l'esmicolament (normalment aigua) fins un nivell de 20 mm per sota de l'eix del tambor. El tambor està muntat de manera que hi hagi una distància de 40 mm entre la base del recipient i la part més baixa de la malla cilíndrica. Els detalls del tambor i recipients es recullen a la Figura 4.4.2.1.
- Un motor capaç de fer girar el tambor a una velocitat de  $40 \pm 1$  r.p.m., durant un període de 30 minuts.
- Una estufa capaç de mantenir a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C, durant un període de com a mínim 24 hores.
- Una balança capaç de pesar el tambor i la mostra amb una precisió de 0,6 g.



**Figura 4.4.2.3.** Esquema de les dimensions de l'equip d'assaig Sehudes.



**Figura 4.4.2.4.** Imatge de l'aparell usat en l'assaig de Sehudes. La presència de dos rodets ens permet realitzar l'assaig a dues graves al mateix temps.

El mètode d'operació és el que es descriu a continuació:

- Es prepara una mostra representativa del material d'estudi formada per deu fragments. Cada fragment ha de pesar entre 40 i 60 g, fet que ens donarà una mostra d'un pes total de 450 a 550 g. Els fragments han de tenir una forma més o menys esfèrica.
- La mostra es col·loca en un dels tambors i es seca fins a un pes constant en l'estufa. Es registra el pes A del tambor amb la mostra i es procedeix de forma immediata a l'assaig.
- Es col·loca la tapa del tambor, el conjunt es munta al recipient i s'acobla el motor.
- El recipient s'omple amb aigua de l'aixeta a 20 °C, fins a un nivell 20 mm per sota de l'eix del tambor. Es fa girar el tambor durant 30 minuts a 20 r.p.m.
- Es retira el tambor del recipient, es separa la tapa i es col·loca el tambor amb la porció de mostra restant a l'estufa. Una vegada es seca la mostra, es registra el pes B del tambor més la porció de mostra retinguda.
- El tambor es neteja i es registra el seu pes C.

L'índex de Sehudes és la relació del pes final al pes inicial de la mostra, expressada en tant per cent.

$$I = \frac{B - C}{A - C} 100 \quad (7)$$

A continuació s'indiquen la magnitud dels diferents valors que por donar l'índex de Sehudes:

- $I = 0 - 30$  representa una durabilitat a l'esmicolament molt baixa.
- $I = 30 - 60$  és un material de durabilitat a l'esmicolament baixa.
- $I = 60 - 85$  correspon a una durabilitat mitja.
- $I = 85 - 95$  representa una durabilitat a l'esmicolament mitja – alta.
- $I = 95 - 98$  és una durabilitat a l'esmicolament alta.
- $I = 98 - 100$  representa una durabilitat molt alta.

##### 4.4.3. Resistència química

Per a la determinació de la resistència química també s'han realitzat tres assajos. Per poder escollir-los ens hem basat en que la grava està constantment en contacte amb aigua i amb àcids i en que els sulfats són un dels components més solubles i majoritaris en les graves.

Així doncs, els tres assajos realitzats han estat la 'Determinació de sulfats solubles en aigua', la 'Determinació de sulfats solubles en àcid' i la 'Determinació de la solubilitat en aigua'; tots tres recollits en la Norma Espanyola EN 1744-1:1998.

Així com en el cas de la determinació de la resistència mecànica de les graves, la realització dels assajos no ha seguit al peu de la lletra la normativa degut a que s'han fet les modificacions que s'han cregut necessàries per adaptar els assajos al tipus de grava que presenten els aiguamolls.

##### Sulfats solubles en aigua

Segons la Norma Espanyola citada, EN 1744-1:1998, el procediment a seguir per al present assaig és el que es descriu a continuació:

D'una mostra d'assaig de l'àrid s'extreuen amb aigua els ions sulfat solubles en la mateixa. En contingut de sulfats solubles en aigua es determina per precipitació, a pH entre 1 i 1,5, amb una dissolució de clorur de bari a ebullició. La dosificació es finalitza per gravimetria. El contingut d'ions sulfat s'expressa en %, en massa, en relació a la massa de l'àrid.

Per a la preparació de la mostra el que es fa és secar-la a una temperatura de  $110 \pm 5$  °C (estufa) fins aconseguir una massa constant. De l'àrid es preparen dues mostres de  $500 \pm 75$  g. cada una.

Degut a que les mostres es componen d'àrids fins, s'usen dues ampolles de 2 litres de capacitat. S'introdueix cada mostra en una d'elles. Seguidament s'introdueix 1 litre d'aigua a cada ampolla, es tapen i es barreja el contingut mitjançant un agitador de sacsejades (Figura 4.4.3.1.) durant 24 hores. Passades les 24 hores es filtren els extractes a través de papers de filtre de fibra de vidre.

Amb una pipeta, es posen 50 ml de l'extracte filtrat en un vas de precipitats de 500 ml. A continuació es dilueix amb aigua fins a un volum de 300 ml i s'afegeixen 10 ml de la dissolució d'àcid clorhídric (200 ml d'àcid clorhídric concentrat més 800 ml d'aigua). Es porta la dissolució a ebullició durant 5 minuts. S'agita vigorosament i, continuant en ebullició, s'afegeixen gota a gota 5 ml de la dissolució de clorur de bari (dissolució de 100 grams de clorur de bari en 1 litre d'aigua). Es continua amb l'ebullició durant 15 minuts per obtenir una precipitació completa. Es deixa reposar durant 30 minuts a temperatura propera a la d'ebullició i seguidament es deixa en una lloc calent tota la nit. Després d'això es transfereix el precipitat de sulfat de bari, filtrant al buit, a un cresol prèviament calcinat i tarat. El cresol es seca a l'estufa durant 30 minuts i seguidament es calcina a la mufla fins aconseguir una massa constant (15 minuts). Es deixa refredar al dessecador i es pesa amb exactitud de 0,1 mg. Es calcula la massa de precipitat  $m_3$  a partir de l'augment de la massa del cresol.

Amb això tenim que:

$$SO_3(\%) = 2 \times m_3 \times W \times 0.343 \quad (7)$$

On  $m_3$  és la massa del precipitat de sulfat de bari, en grams

$W$  és la relació aigua/àrid, en gr/gr. En aquest cas és 100 gr/massa dels àrids



**Figura 4.4.3.1.** Imatge d'un agitador mitjançant sacsejades.

#### Sulfats solubles en àcid

Segons la Norma Espanyola EN1744-1:1998, el procediment a seguir és el que es descriu a continuació. :

De la mateixa manera que a l'assaig anterior, els sulfats s'extreuen d'una mostra d'assaig de l'àrid mitjançant una dissolució d'àcid clorhídric diluït, els quals es determinen per gravimetria. El contingut en ions sulfat s'expressa en ppm.

Es tritura i redueix la mostra fins a obtenir una massa aproximada de 20 gr que passi pel tamís de 0,125 mm.

Es pesa la mostra de l'assaig amb exactitud de 0,1 mg (m6) i s'introdueix en un vas de precipitats de capacitat 250 ml en el qual també s'hi posen 90 ml d'aigua destil·lada freda. A continuació i, mentre s'agita la mescla vigorosament, s'afegeixen 10 ml d'àcid clorhídric concentrat. S'escalfa moderadament la dissolució i es redueix la mida de les partícules sòlides amb l'extrem d'una vareta de vidre. Es deixa la dissolució en digestió durant 15 minuts a una temperatura lleugerament inferior a la



d'ebullició. Es filtra el residu a través d'un paper de filtre sobre un vas de precipitats de 400 ml. Es renta a fons amb aigua bullint fins que el filtrat no tingui ions clorurs al assajar-lo amb la dissolució de nitrat de plata. S'eleva el residu a un volum d'uns 250 ml aproximadament i, si fos necessari, s'acidificaria amb àcid clorhídric fins a obtenir un color vermell amb l'indicador de vermell de metilè. S'eleva la dissolució a temperatura d'ebullició i es manté durant 5 minuts. Es comprova que la dissolució estigui clara i, de no ser així, es començaria de nou l'assaig amb una nova mostra. Es neutralitza la mostra dins a valors de pH al voltant de 9. Es deixa reposar, es filtra i s'assaja la mostra amb el cromatògraf. Aquest ens dóna les parts per milió (ppm) d'ió sulfat present a la mostra. Al resultat obtingut cal restar-li la quantitat d'ions sulfat presents a l'aigua miliQ usada per neutralitzar les mostres.

Així doncs, la quantitat d'ions sulfat presents a cada mostra són:

$$[SO_4^{=}]_{final} (ppm) = [SO_4^{=}]_{mostra} - [SO_4^{=}]_{miliQ}$$

Cal afegir que, com en la majoria de casos, es realitzen tres rèpliques de cada mostra per evitar possibles errors grollers o de mesura.

### Solubilitat en aigua

Segons la Norma Espanyola EN1744-1:1998, el procediment a seguir per al present assaig és el que es descriu a continuació:

Es pesa la mostra d'assaig seca amb exactitud de 0,1 gr. (m11) abans de col·locar-la en contacte amb l'aigua. Després de realitzar el procediment seguit en l'assaig de sulfats solubles en aigua, de col·locar amb 1 litre d'aigua la mostra d'àrid i agitar-la durant 24 hores, l'àrid es recupera, es seca es refreda i es torna a pesar amb exactitud de 0,1 g i es calcula la massa de l'àrid restant-li a aquesta les masses de la bandeja i els filtres usats durant el procediment (m12).

Finalment es calcula la solubilitat en aigua de l'àrid (WS) en %, mitjançant l'expressió següent:

$$WS(\%) = \frac{(m11 - m12) \times 100}{m11} \quad (9)$$

On  $m_{11}$  és la massa de l'àrid abans de l'extracció en grams

$m_{12}$  és la massa de l'àrid després de l'extracció en grams.

#### Solubilitat en àcid i Proctor Normal

Com a complement a tots els assajos realitzats s'ha fet una combinació de dos d'ells per comprovar si el fet de que la grava estigui constantment en contacte amb àcid provoca que la resistència mecànica de la grava variï de manera significativa o no.

## 5. Resultats i discussió

En relació amb els assajos realitzats, a continuació es pretenen exposar de manera clara i entenedora, els resultats obtinguts per als dos aiguamolls d'estudi i la discussió dels mateixos.

### 5.1. Acumulació de sòlids

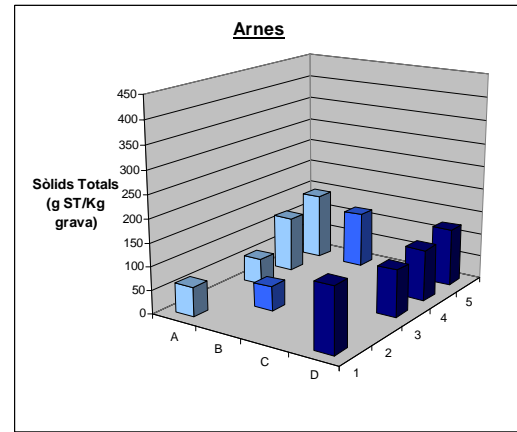
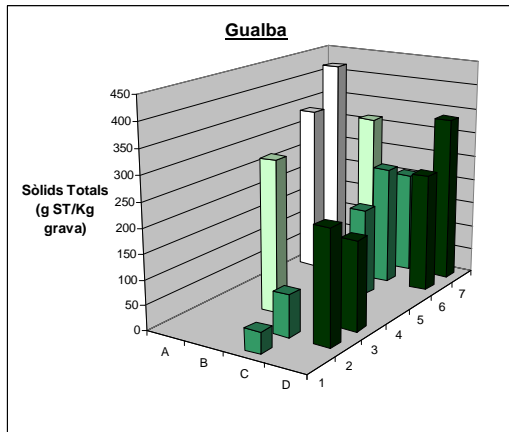
Degut a que és a l'entrada de l'aiguamoll on es rep la càrrega de sòlids i on s'eliminaran majoritàriament, els sòlids totals (ST) haurien de ser majors a l'entrada de l'aiguamoll que no pas a la sortida (Tanner et al., 1998).

A l'aiguamoll de Gualba els sòlids totals augmenten a mida que ens acostem a la sortida de l'aiguamoll (118 g ST/kg grava a l'entrada i 318 g ST/kg grava a la sortida). A l'aiguamoll d'Arnes la tendència és la mateixa (84 g ST/kg grava a l'entrada i 128 g ST/kg grava a la sortida) (Figura 5.1.1). Aquest patró (major concentració de sòlids a la sortida de l'aiguamoll que a l'entrada) no coincideix amb altres estudis realitzats. Pedescoll et al. (2009) trobaren acumulacions decreixents de ST, en un aiguamoll de característiques similars, de l'entrada a la sortida del mateix. Caselles-Osorio et al. (2007) trobaren distribucions de sòlids bastant heterogènies tot i què, en general, l'acumulació era major a l'entrada que a la sortida.

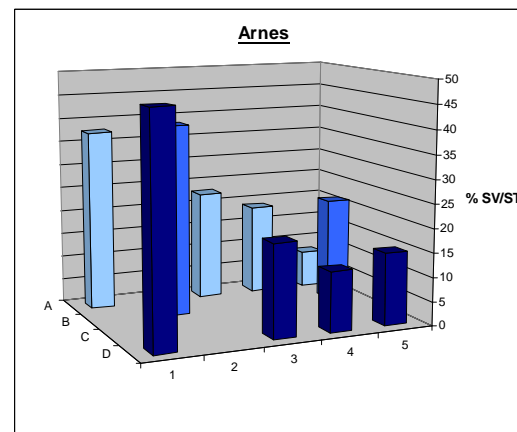
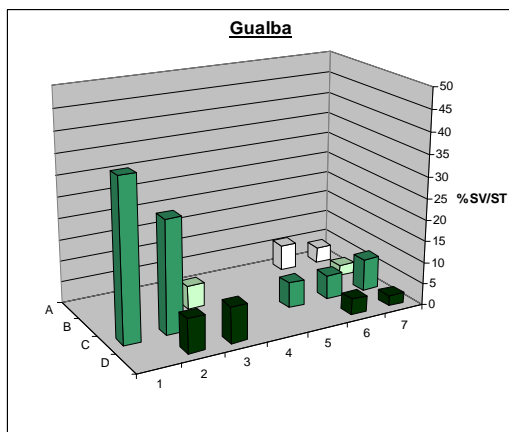
A més, a l'aiguamoll de Gualba, la quantitat de ST a la sortida és tres vegades més gran que la quantitat de ST a la sortida de l'aiguamoll d'Arnes. Una possible causa d'aquesta diferència de quantitat de sòlids als dos aiguamolls, a banda de la major carrega de sòlids a l'entrada (A l'entrada de Gualba hi arriben 407 mg ST/L i a l'entrada d'Arnes 286 mg ST/L), pot ser deguda a la degradabilitat del material filtrant, aspecte que s'estudia en els següents apartats.

La distribució en planta de la quantitat de sòlids totals ens permet conèixer el camí que segueix l'aigua dins el mateix (Figura 5.1.1). S'observa un camí preferencial en diagonal des de l'entrada del transecte D fins l'arqueta de recollida de l'aigua filtrada, situada al punt A7 (a la Figura 4.2.1.1. està representat l'aiguamoll en planta amb els seus punts de mostreig). Aquest trajecte que segueix l'aigua també queda reflectit als resultats de Samsó, R., 2009, en què mesuraven la colmatació mitjançant la conductivitat hidràulica del medi granular. A Arnes, en canvi, tot i que en general la quantitat de ST és més gran a la sortida que a l'entrada, no queda reflectit en la mesura de la conductivitat hidràulica (més alta a la sortida que a l'entrada en totes les parcel·les).

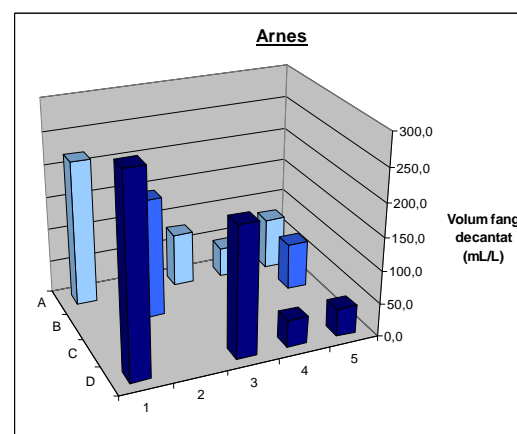
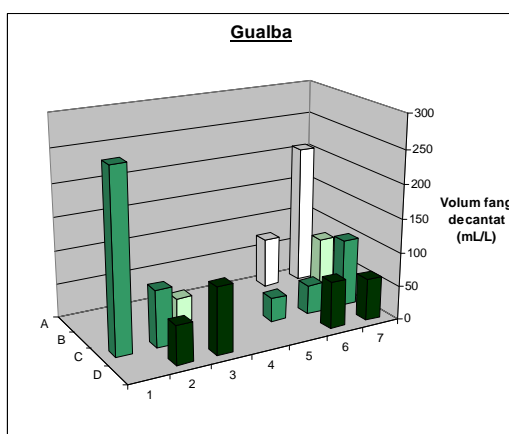
## 5. Resultats i discussió



**Figura 5.1.1.** Acumulació de sòlids totals en cadascun dels punts estudiats als aiguamolls de Gualba i Arnes respectivament.



**Figura 5.1.2.** % de SV respecte dels ST en cadascun dels punts estudiats als aiguamolls de Gualba i Arnes respectivament.



**Figura 5.1.3.** Decantabilitat en cadascun dels punts estudiats als aiguamolls de Gualba i Arnes respectivament.

Els resultats de ST obtinguts reforcen la hipòtesi de l'estudi Samsó, R., 2009 de què aquest recorregut de l'aigua dins l'aiguamoll pot ser causat, d'una banda, pel mal repartiment de l'aigua a l'entrada, i de l'altra per la relació longitud – amplada de l'aiguamoll (1:2 i 3:1 a Gualba i a cada parcel·la d'Arnes, respectivament). El sistema de distribució de l'afluent a Arnes (una canonada perforada) resulta menys adequat que el de Gualba (una canal de formigó, similar a un abeurador), ja que la canonada, amb el temps s'assenta en el terreny provocant zones de major afluença d'aigua (parcel·la D), augmentant en aquestes la càrrega de sòlids a l'entrada. D'altra banda, la parcel·lació en cel·les amb relació longitud – amplada major a 1 (3:1 a l'aiguamoll d'Arnes), fa que l'aigua segueixi trajectòries més uniformes dins l'aiguamoll i es força a què l'aigua ocupi tota l'amplada de la cel·la. D'aquesta manera s'aconsegueixen evitar els camins preferencials observats a Gualba.

Atenent a la naturalesa del sòlids acumulats, en ambdós aiguamolls estudiats, la relació de sòlids volàtils (SV) respecte als ST té tendència a disminuir de l'entrada a la sortida dels aiguamolls. Aquest comportament es dona en tots els transectes dels dos aiguamolls, fet que pot indicar que l'aiguamoll està realitzant una de les seves funcions de depuració, consistent en degradar la matèria orgànica, és a dir, transformar-la en inorgànica, de manera que, els SV disminueixin. Aquesta disminució s'observa igualment en la taxa d'acumulació de SV expressats en grams per quilogram de grava i per any (Taules 5.1.1. i 5.1.2.).

El tant per cent que representen els SV respecte dels ST als aiguamolls de Gualba i Arnes és en ambdós casos força baix (el 4 % de mitjana a la sortida de l'aiguamoll de Gualba i el 15 % de mitjana a la sortida de d'Arnes). Segons l'article Tanner et al., 1998, la relació trobada de sòlids volàtils respecte sòlids totals a la sortida de l'aiguamoll fou del 80 % aproximadament; valor que no s'assoleix en cap dels dos aiguamolls d'estudi. L'article de Kadlec and Watson (1993) obté com a resultat tot el contrari, i és que a la sortida de l'aiguamoll només hi troba el 20 % de matèria orgànica, fet que s'assembla molt més als resultats obtinguts en el present estudi. Altres estudis com Caselles-Osorio et al, 2007 o Pedescoll et al, 2009 també mostren valors més semblants als trobats al nostre cas.

## 5. Resultats i discussió

**Taula 5.1.1.** Taxes d'acumulació de ST i SV, decantabilitat i IVF per a l'aiguamoll de Gualba en cadascun dels punts estudiats.

GUALBA	A				B				C				D			
	Taxa acum. ST (g/Kg grava-any)	Taxa acum. SV (g/Kg grava-any)	Volum fang decantat (mL/L)	IVF (mL/mg)	Taxa acum. ST (g/Kg grava-any)	Taxa acum. SV (g/Kg grava-any)	Volum fang decantat (mL/L)	IVF (mL/mg)	Taxa acum. ST (g/Kg grava-any)	Taxa acum. SV (g/Kg grava-any)	Volum fang decantat (mL/L)	IVF (mL/mg)	Taxa acum. ST (g/Kg grava-any)	Taxa acum. SV (g/Kg grava-any)	Volum fang decantat (mL/L)	IVF (mL/mg)
1									41,9	15,6	265,6	16,1				
2									84,9	22,2	84,0	7,0	228,3	18,0	57,1	3,1
3					304,7	16,6	37,00	2,8					178,8	15,0	98,5	4,6
4																
5									174,9	10,3	35,8	3,1				
6	336,3	20,2	74,7	2,4					238,3	13,4	43,0	2,5	238,5	9,0	68,9	2,6
7	417,3	15,2	206,3	2,3	313,3	8,0	83,1	2,9	205,5	15,5	100,0	3,1	334,4	8,1	62,2	2,4

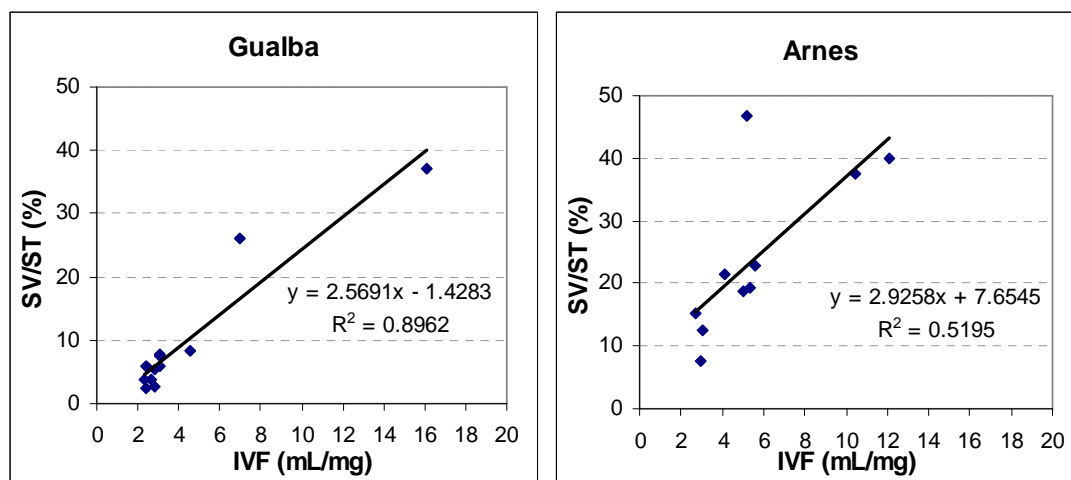
**Taula 5.1.2.** Taxes d'acumulació de ST i SV, decantabilitat i IVF per a l'aiguamoll d'Arnes en cadascun dels punts estudiats.

ARNES	A				B				D			
	Taxa acum. ST (g/Kg grava-any)	Taxa acum. SV (g/Kg grava-any)	Volum fang decantat (mL/L)	IVF (mL/mg)	Taxa acum. ST (g/Kg grava-any)	Taxa acum. SV (g/Kg grava-any)	Volum fang decantat (mL/L)	IVF (mL/mg)	Taxa acum. ST (g/Kg grava-any)	Taxa acum. SV (g/Kg grava-any)	Volum fang decantat (mL/L)	IVF (mL/mg)
1	6,30	2,37	221,0	10,426					13,79	6,44	298,0	5,149
2					5,26	2,10	180,0	12,108				
3	5,60	1,28	80,8	5,586					10,06	1,94	197,0	5,380
4	11,77	2,22	45,4	5,048					10,90	1,36	40,9	3,031
5	14,24	1,09	77,9	2,981	11,91	2,56	71,0	4,088	12,24	1,85	42,1	2,706

Els valors trobats de tant per cent de sòlids volàtils respecte sòlids totals a les sortides dels dos aiguamolls d'estudi representen unes quantitats de 12 g SV/kg grava i 306 g M.Inorg./kg grava a la sortida de Gualba i de 18 g SV/kg grava i 110 g M.Inorg/kg grava a la sortida d'Arnes. Així doncs, tot i que el tant per cent de SV respecte ST a l'aiguamoll de Gualba sigui una mica menor al d'Arnes, els grams de Matèria Inorgànica (M.Inorg) per cada quilogram de grava, són tres vegades més elevats. Tenint en compte que l'aiguamoll de Gualba rep una càrrega orgànica superior al d'Arnes i que la grava s'ha reemplaçat recentment (mentre a l'aiguamoll d'Arnes la grava té uns 10 anys), esperàriem trobar percentatges de SV/TS més alts. Això ens porta a pensar que part del fang que s'acumula a l'aiguamoll de Gualba pugui provenir de la grava.

L'índex volumètric de fang (IVF) indica el volum de fang decantat en relació a la quantitat de sòlids que presenta cada mostra. Així doncs, quant menor és l'índex volumètric de fang, millor decanten els sòlids, i ocupen menys espai dins l'aiguamoll, fet que permet que hi hagi més zones lliures de pas per a la circulació de l'aigua. Dit això, el que esperàriem trobar és que l'IVF fos menor cap a la sortida de l'aiguamoll on, teòricament, hi ha més matèria inorgànica, que decanta més fàcilment que la matèria orgànica.

A l'aiguamoll d'Arnes, l'IVF disminueix de l'entrada a la sortida de l'aiguamoll, tendència que també s'observa a l'aiguamoll de Gualba. Aquest comportament no coincideix amb el comportament dels sòlids totals però sí està en acord amb la tendència dels sòlids volàtils. De fet, fent una regressió relacionant els SV amb l'IVF (Figura 5.1.4.) es pot veure que en augmentar el percentatge de volàtils respecte els ST també augmenta l'IVF (en disminueix la decantabilitat). Així doncs, tot i què l'acumulació de sòlids és major a la sortida de l'aiguamoll que a l'entrada, els sòlids que s'acumulen a la sortida són més decantables ja que el tant per cent de sòlids volàtils que presenten respecte dels totals és menor. Per tant, la mesura dels Sòlids Totals com a indicador de la colmatació ha d'anar acompanyada de la determinació d'altres paràmetres per poder reflectir la colmatació d'una manera més fiable. Això és degut a que la incidència en la colmatació no depèn només de la quantitat sinó també de la qualitat dels sòlids (Llorens et al., 2008; Pedescoll et al., 2009).



**Figura 5.1.4.** Relació entre el percentatge de SV/ST i l'índex volumètric de fangs a Gualba i a Arnes .

Amb tots aquests resultats, s'observa clarament com l'aiguamoll de Gualba presenta un grau de colmatació més elevat que l'aiguamoll d'Arnes ja que té més sòlids totals en tot el conjunt de l'aiguamoll (118 g ST/kg grava i 318 g ST/kg grava a l'entrada i la sortida respectivament de l'aiguamoll de Gualba i 84 g ST/kg grava i 128 g ST/kg grava a l'entrada i a la sortida respectivament de l'aiguamoll d'Arnes) i a més, la decantació del fang a Gualba és menor que a Arnes (la decantabilitat, en mL/L, és de 266 i 113 a l'entrada i la sortida respectivament de l'aiguamoll de Gualba i de 233 i 64 a l'entrada i la sortida respectivament de l'aiguamoll d'Arnes). Aquests comportaments no són coincidents amb els trobats a l'estudi de Samsó, R., 2009. ja que, en ell, mitjançant la conductivitat hidràulica, s'obtingué que ambdós aiguamolls presentaven pràcticament el mateix grau de colmatació degut als valors de conductivitat hidràulica trobats, tot i que Arnes porta més temps, des de l'últim canvi de grava, en operació (10 anys) que Gualba (1 any).

Com s'ha pogut observar, la configuració de disseny d'un aiguamoll és decisiva per al comportament de l'aigua i dels sòlids dins del sistema. Un mal repartiment de l'aigua d'entrada (diferent cabal en cada punt de la canonada d'entrada i assentaments diferencials de la mateixa) o una mala relació de la seva longitud respecte la seva amplada (valors més baixos que 1:1 en relació longitud - amplada) provoquen una distribució de l'aigua no uniforme en l'aiguamoll que dona lloc a zones amb més acumulació de cabal que d'altres i per tant, zones amb major acumulació de sòlids que d'altres. Aquest fet s'ha pogut determinar a partir de que a Arnes, la quantitat de ST és major a l'últim transecte (D) que no pas en tots els altres (Figura 5.1.1.). També és un aspecte observable a Gualba, en que la seva relació longitud – amplada és menor a 1 (1:2), fet que produeix una distribució no uniforme de l'aigua en l'aiguamoll.

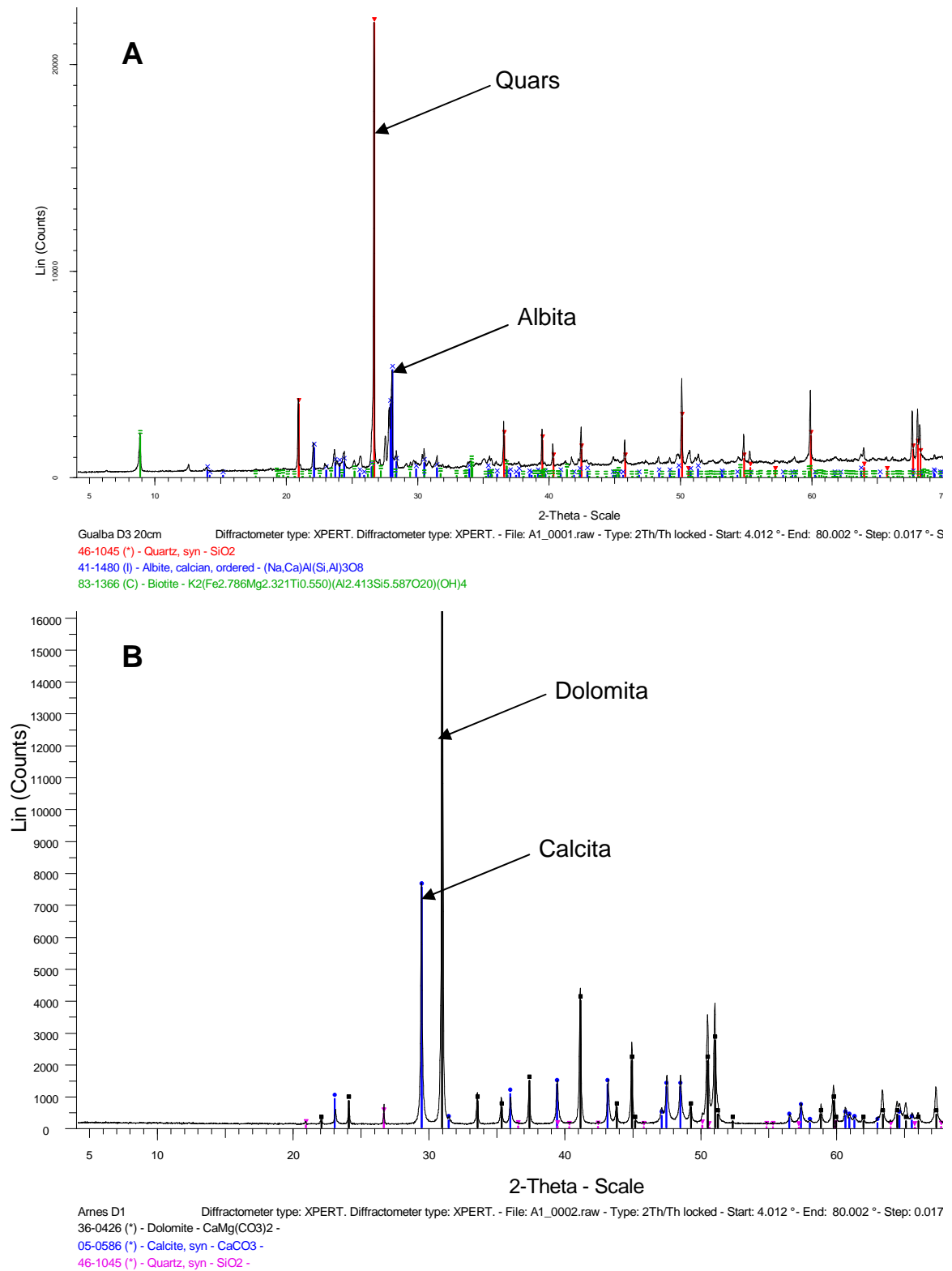


## 5.2. Composició mineral

D'acord amb l'estudi per difracció de rajos X a les graves dels aiguamolls d'estudi (Figura 5.2.1.), la grava de Gualba és d'origen granític i la d'Arnes d'origen calcari. La grava de Gualba es compon principalment de quars (52 %), albita (39 %) i biotita (9 %); mentre que la grava d'Arnes està formada bàsicament per dolomita (66 %), calcita (33 %) i quars (1 %). L'albita de la grava de Gualba correspon a un feldespat i la biotita a una mica, i la dolomita i la calcita de la grava d'Arnes corresponen al grup dels carbonats, majoritàriament de calci i magnesi.

Així doncs, ambdós aiguamolls d'estudi tenen graves molt diferents, per la qual cosa, els seus comportaments en front d'atacs químics de l'aigua o desgast mecànic al llarg del temps probablement siguin també diferents.

Els minerals que formen la grava de Gualba es caracteritzen per tenir una alta durabilitat degut a la seva resistència al desgast. Tot i això, al presentar-se conglomerats els uns amb els altres, l'esmicolament és un dels problemes que pot presentar aquest tipus de material. Un altre aspecte que el fa vulnerable són els canvis bruscos de temperatures, que poden provocar que el material es disgregui o s'escami (Bauer, J., 1981 i Hurlbut, C.S. & Klein, C., 1982). Els minerals que formen la grava d'Arnes, en canvi, tenen una estructura molt compacta i resistent tot i que presenten menor resistència a l'abrasió que la pedra granítica.



**Figura 5.2.1.** Resultat de la difracció de rajos X de la grava de Gualba (A) i Arnes (B).

### 5.3. Resistències mecànica i química

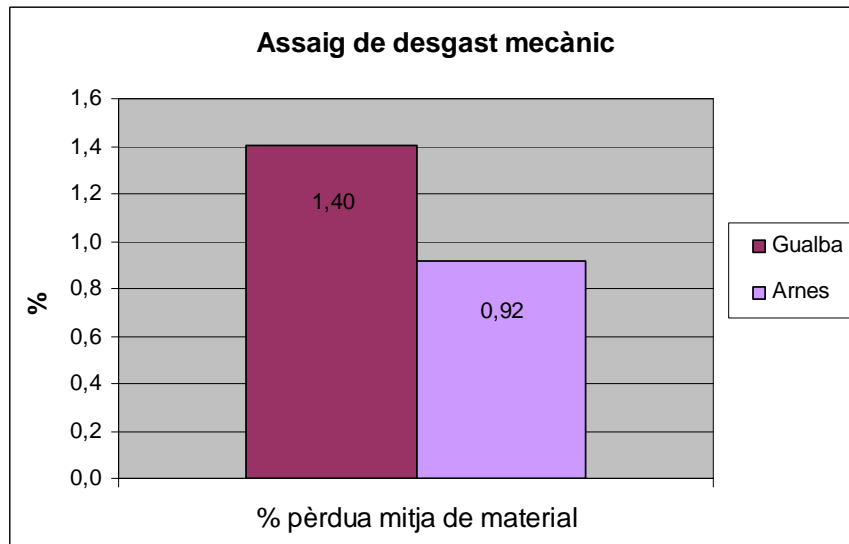
Donat que la quantitat de matèria inorgànica en els aiguamolls (48 i 110 g/kg grava a l'entrada i a la sortida de Gualba; 100 i 306 g/kg grava a l'entrada i a la sortida a Arnes respectivament) és força important (sobretot a l'aiguamoll de Gualba), sembla plausible pensar que part d'aquesta contribució sigui deguda a l'esmicolament o degradació de la grava de cadascun dels aiguamolls. Amb l'estudi de les resistències tant mecànica com química de les graves dels diferents aiguamolls es pretén determinar la qualitat de la grava com a material filtrant. Tal i com ja s'ha comentat, la vida útil dels aiguamolls i, per tant, el grau de colmatació al que puguin arribar en un període de temps determinat, depèn de molts factors, un dels quals pot ser la naturalesa de la grava i les propietats mecàniques i químiques que té associades.

#### Assaig de resistència al Desgast Mecànic

L'assaig de resistència al desgast mecànic ens proporciona l'índex de durabilitat a l'esmicolament o índex de sehudes (Taula 5.3.1). En ambdós casos, la quantitat de material perdut en l'assaig és molt baix (1,4 % de pèrdua de material a la grava de Gualba i 0,92 % a la grava d'Arnes) (Figura 5.3.1).

**Taula 5.3.1.** Pèrdua de material en l'assaig de resistència al Desgast Mecànic als aiguamolls de Gualba i Arnes.

Aiguamoll	Índex de Sehudes o Índex de durabilitat a l'esmicolament (adim.)
Gualba	98,60 ± 0,28
Arnes	99,08 ± 0,21



**Figura 5.3.1.** Gràfic de pèrdua de material amb l'assaig de Desgast Mecànic als dos aiguamolls d'estudi.

La norma usada, NLT – 251/91 presenta una classificació de la qualitat del material segons l'Índex de Sehudes obtingut. Aquesta classificació consisteix en una divisió dels possibles valors de l'Índex de Sehudes, que pot variar de 0 a 100, en sis grups de valors (0-30, 30-60, 60-85, 85-95, 95-98, i 98-100) i que descriuen la grava d'estudi des de una durabilitat a l'esmicolament molt baixa ( $I = 0 - 30$ ) fins una durabilitat a l'esmicolament molt alta ( $I = 98 - 100$ ). Aquesta classificació es descriu amb més detall a l'apartat 4.4.2. *Resistència Mecànica*. Amb aquesta classificació i amb els baixos valors obtinguts de pèrdua de material (Figura 5.3.1.) podem assegurar que el material té molt alta durabilitat a l'esmicolament.

Tot i que els valors de pèrdua de material són molt semblants pels dos aiguamolls d'estudi, el que si que podem observar és que el percentatge de pèrdua de material és més elevat per Gualba que per Arnes, fet que pot indicar que la grava de Gualba és lleugerament menys resistent al desgast mecànic que la grava d'Arnes.

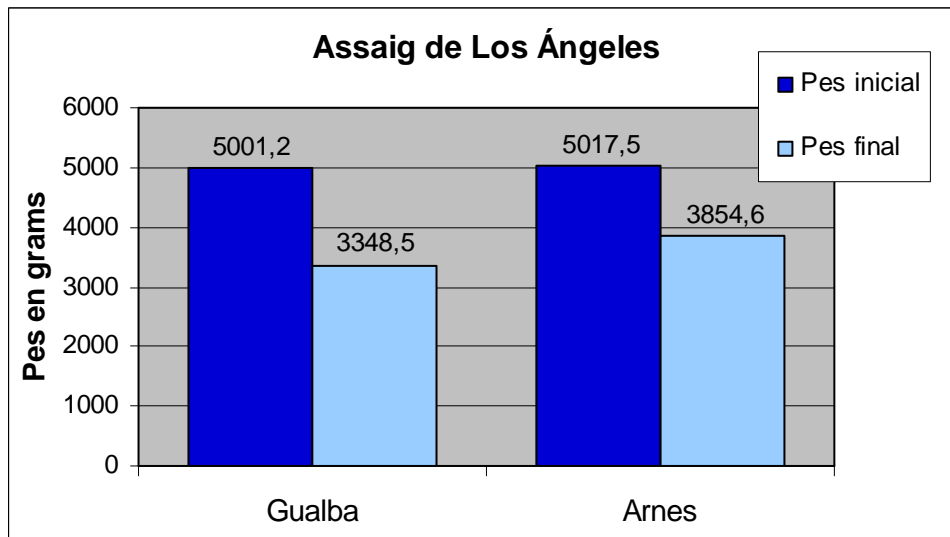
### Assaig de Los Angeles

L'assaig de Los Angeles és un assaig usat majoritàriament per a àrids destinats a ferms de carreteres o materials de construcció. En aquest cas, el material analitzat no requereix una resistència tant elevada com en els casos dels tipus de construcció esmenats però ens permet comparar les diferents graves d'estudi per saber quina és menys resistent en front a grans esforços.

D'acord amb aquest assaig la grava d'Arnes presenta un coeficient de LA bastant menor al de la grava de Gualba. Arnes té un LA de 23,26 i Gualba de 33,05 (Taula 5.3.2 i Figura 5.3.2). Aquests valors indiquen que la grava d'Arnes és més resistent al desgast. Tenint en compte que, materials amb  $LA > 35$  no s'admeten en construcció per la seva baixa resistència al desgast, la grava de Gualba és més susceptible al desgast mecànic que la d'Arnes.

**Taula 5.3.2.** Valor del coeficient de Los Ángeles obtingut als aiguamolls de Gualba i Arnes.

Aiguamoll	Coefficient de LA
Gualba	33,054
Arnes	23,258



**Figura 5.3.2.** Comparació dels pesos abans i després de l'assaig de Los Ángeles dels dos aiguamolls d'estudi.

Així doncs i, tenint en compte únicament aquest assaig, es pot dir que la grava d'Arnes presenta millors condicions com a material filtrant d'un aiguamoll ja que és més resistent al desgast mecànic.

#### Assaig Proctor Normal

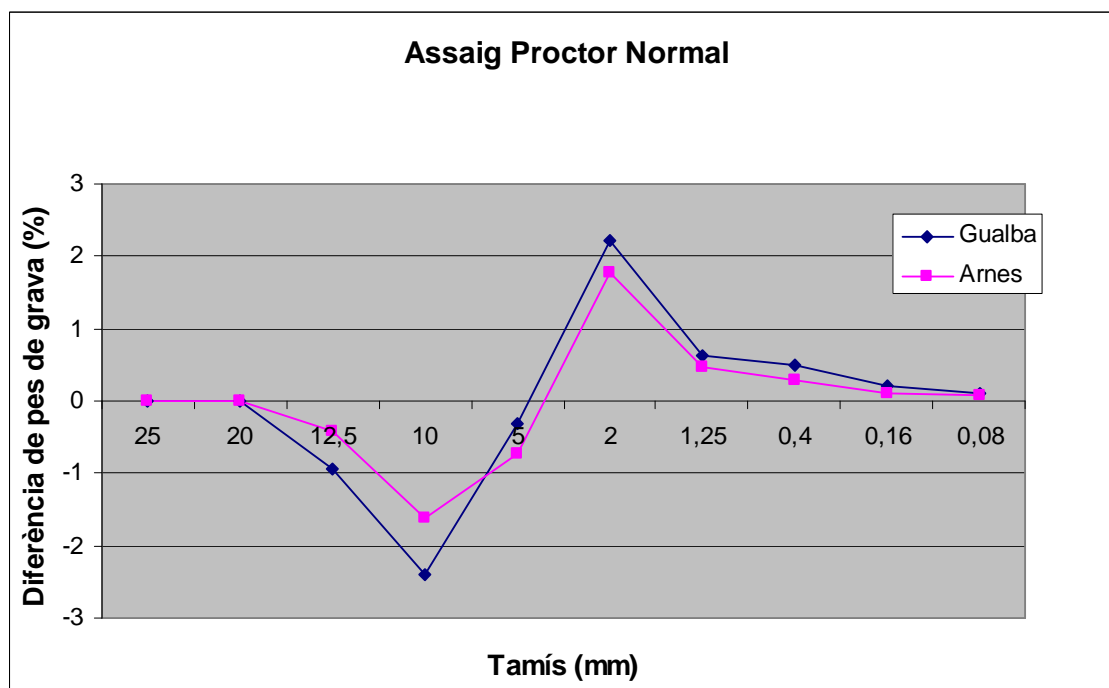
A la Figura 5.3.3. es poden observar els diferents valors, tot i que semblants comportaments, entre l'aplicació de l'assaig Proctor Normal a la grava de l'aiguamoll de Gualba i a la d'Arnes. L'assaig ha estat realitzat amb tres mostres del mateix

material per tal de tenir més confiança en els resultats obtinguts. Els valors negatius corresponen a la pèrdua de material i valors positius corresponen al guany de material.

Després de realitzar l'assaig Proctor Normal a les graves, s'observa una pèrdua de material en els tamisos més grans (pèrdua de fins al 2,3 % a Gualba i del 1,6 % a Arnes al tamís de 10 mm de pas); material que es guanya en tamisos més petits degut a que en l'aplicació d'aquest assaig la quantitat de grava total es manté constant.

El tant per cent de material afectat degut a l'aplicació de l'assaig és molt baix en les graves dels dos aiguamolls. Tot i així, a Gualba l'afectació de l'assaig és més gran que a Arnes, de manera que aquest assaig corrobora que la grava de Gualba és menys resistent a esforços mecànics que la d'Arnes.

En relació amb els dos assaigs de resistència mecànica prèviament realitzats, s'observa que el resultat general obtingut és el mateix, el qual indica que la grava d'origen granític de l'aiguamoll de Gualba té una resistència mecànica menor a la grava d'origen calcari present a l'aiguamoll d'Arnes.



**Figura 5.3.3.** Diferència entre les corbes granulomètriques abans i després de l'assaig Proctor Normal. Es mostren les corbes dels dos aiguamolls d'estudi.

Sulfats solubles en aigua

A la presentació de l'assaig de sulfats solubles en aigua s'ha comentat que els valors que ens interessa conèixer són la relació en massa entre l'aigua i la grava (W) i la massa de precipitat de sulfat de bari ( $m^3$ ) per tal de poder realitzar el càlcul dels sulfats solubles en aigua, expressats en % en massa d'ió sulfat en relació a la massa de l'àrid.

Per aquest assaig s'han realitzat tres repeticions de cada grava. La Taula 5.3.3 mostra les mitjanes i desviacions estàndard obtingudes per als tres assajos de resistència química realitzats.

**Taula 5.3.3.** Valors mitjos de sulfats solubles en aigua, sulfats solubles en àcid i sulfats solubïes en aigua de la grava dels aiguamolls de Gualba i Arnes.

	Gualba	Arnes
Sulfats solubles en aigua (% en massa)	$0,0029 \pm 0,0004$	$0,0059 \pm 0,0008$
Sulfats solubles en àcid (ppm d'ió sulfat)	$0,87 \pm 0,20$	$17,66 \pm 1,48$
Solubilitat en aigua (% en pes)	0,51	0,155

Quant als sulfats solubles en aigua podem concluir que la grava d'Arnes té un contingut més elevat de sulfats que es solubilitzen en aigua que no pas la grava de Gualba. Aquest fet va directament relacionat amb la mineralogia de cada grava, de manera que, la grava d'Arnes, al ser d'origen calcari, té més sulfats solubles en aigua que la grava d'origen granític disposada a l'aiguamoll de Gualba.

Amb això podem dir que, la grava d'Arnes és menys resistent a l'atac químic de l'aigua que la de Gualba. Tot i així, cal observar els valors i deduir que els ordres de magnitud obtinguts remarquen la molt baixa solubilitat de sulfats en aigua en ambdós casos, fet que denota que l'atac químic no sembla ser tant important com el desgast mecànic en les qualitats de la grava.

Sulfats solubles en àcid

Tal i com s'observa a la taula de valors presentada anteriorment (taula 5.3.3.), Arnes presenta molta més quantitat de sulfats solubles en àcid expressats en parts per milió d'ió sulfat present a la mostra (17,66 ppm) que l'aiguamoll de Gualba (0,87 ppm). Aquests resultats segueixen la mateixa tònica que els obtinguts a l'assaig anterior de

la determinació de sulfats solubles en aigua. Tal i com també s'ha indicat, aquest comportament està directament relacionat amb l'origen mineral de les graves.

A diferència dels resultats obtinguts a l'assaig de sulfats solubles en aigua, en el present, la quantitat de sulfats solubles és molt més elevada degut a que l'àcid provoca un atac molt més agressiu als sulfats que no pas l'aigua.

### Solubilitat en aigua

Tal i com s'ha explicat en la presentació de l'assaig de solubilitat en aigua, els valors que ens interessa conèixer són els pesos de la grava abans i després de l'assaig. A la taula exposada 5.3.3. s'ha indicat la solubilitat en aigua de la grava de Gualba (0,51 %) així com la solubilitat de la grava d'Arnes en aigua (0,155 %). Els valors s'expressen en % en pes de material perdut respecte el pes total de la mostra grava inicial.

Aquest assaig no ens dóna resultats clars de la grava quant a possibles components solubles en el medi aquós ja que els valors obtinguts per als dos aiguamolls d'estudi no arriben ni tan sols a l'1% de components solubles en aigua. Tot i així, es pot observar que la solubilitat en aigua de la grava de l'aiguamoll de Gualba és bastant més gran que el valor obtingut per la grava d'Arnes.

Aquest assaig no presenta resultats contradictoris amb els obtinguts en l'assaig de sulfats solubles en aigua sinó que els paràmetres que s'estudien són diferents. És a dir, el resultat obtingut en el present assaig ens dóna un ordre de magnitud referent a tots els components que integren cada una de les graves. En canvi, en l'assaig de sulfats solubles en aigua l'únic paràmetre a estudiar són els sulfats.

La grava de Gualba és tres vegades més soluble en aigua que la d'Arnes; de manera que la matèria dissolta en l'aigua dins l'aiguamoll pot resultar ser més elevada en l'aiguamoll de Gualba i, per tant, aquest podria acumular més sòlids. Tot i així, la grava d'Arnes té més sulfats solubles en medis àcids i aquosos que no pas la grava de Gualba, fet que concorda amb la composició mineral d'ambdues graves. En qualsevol cas, els valors obtinguts són valors prou baixos per considerar que la resistència química de les graves sigui despreciable en front la resistència mecànica.



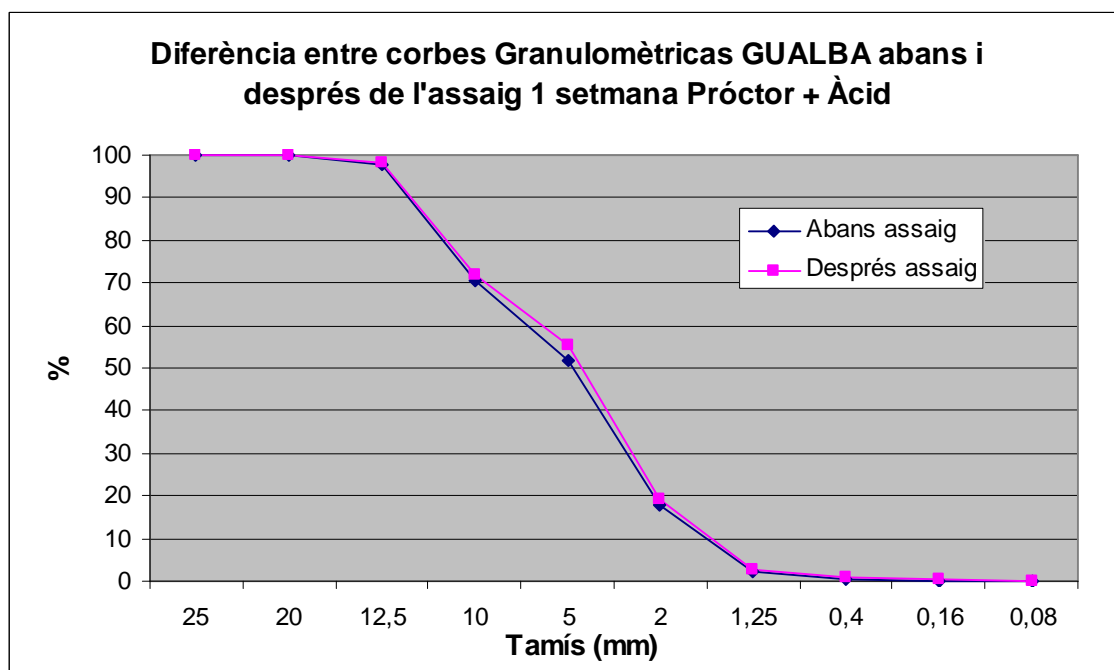
### Assaig Proctor Normal més solubilitat en àcid

Aquest assaig és una combinació entre un de determinació de resistència mecànica i un de resistència química.

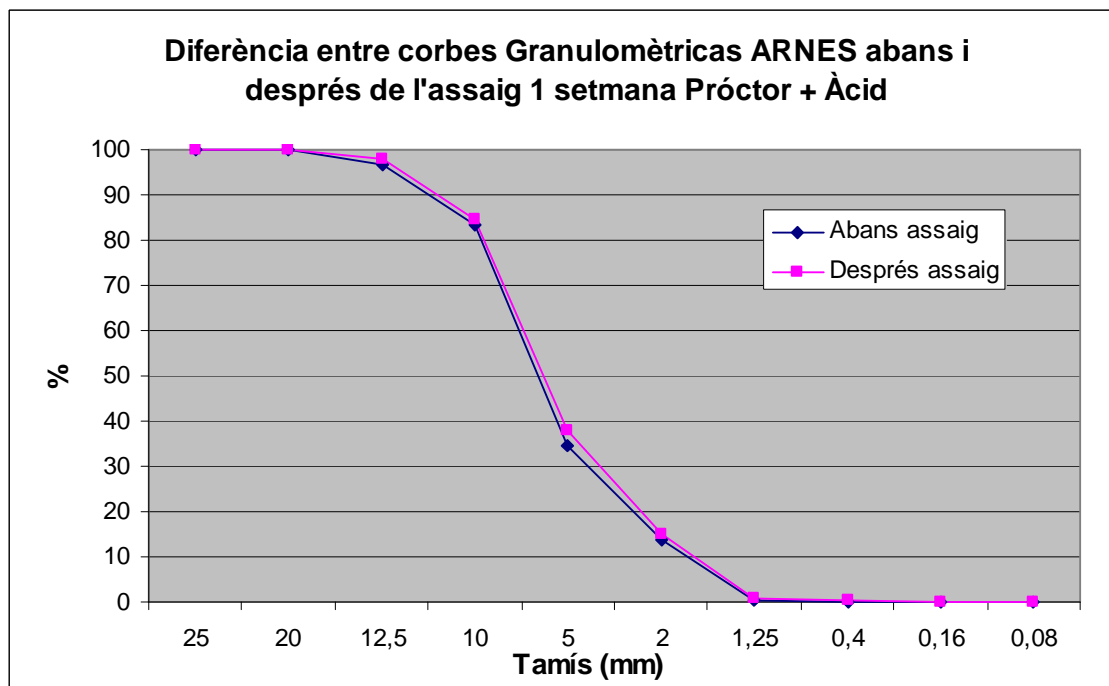
La diferència amb l'assaig Proctor Normal, resultats del qual ja han estat exposats, és que la grava va estar submergida en àcid durant una setmana entre el dia de la realització de la primera granulometria i el dia d'assajar-la mitjançant l'assaig Proctor Normal. Aquest assaig es va realitzar per poder tenir una altra dada de la influència del contacte de l'àcid amb la grava.

La dissolució d'àcid usada ha estat d'àcid clorhídric 1N.

Els resultats obtinguts han estat els que es mostren a les gràfiques següents (figures 5.3.4. i 5.3.5.)



**Figura 5.3.4.** Diferència entre les corbes granulomètriques abans i després de l'assaig Proctor Normal i tenint la mostra submergida en àcid durant una setmana de la grava de Gualba.



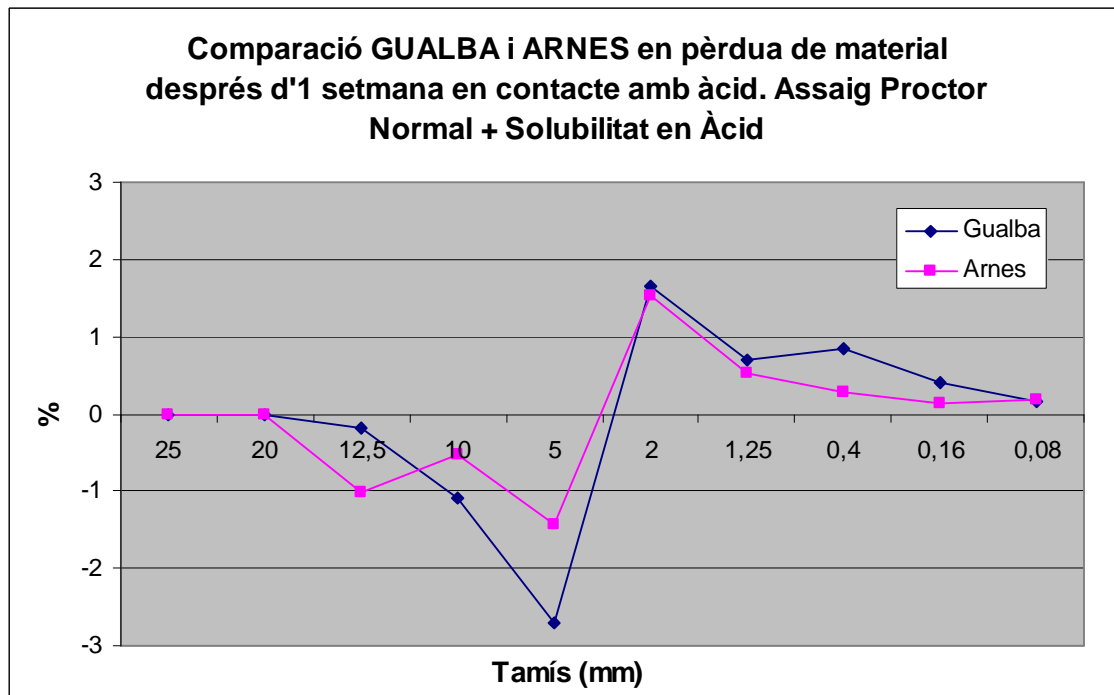
**Figura 5.3.5.** Diferència entre les corbes granulomètriques abans i després de l'assaig Proctor Normal i tenint la mostra submergida en àcid durant una setmana de la grava d'Arnes.

Cal indicar que, durant tot l'estudi, s'han utilitzat tamisos ASTM que caracteritzessin millor les fraccions més gruixudes de la grava ja que la sèrie de tamisos establerta per ASTM ens dona molt detall de la fracció petita de l'àrid però no de la fracció gruixuda de la grava, en canvi les mostres que analitzem són molt uniformes i sense gran quantitat de fins.

A les gràfiques s'observa que la granulometria després de l'assaig no varia respecte la inicial i per tant queda remarcada la poca importància, ja citada en el corresponent assaig de sulfats solubles en aigua, del contacte de l'àcid amb la grava, al menys durant un període relativament curt de temps.

El que volem conèixer, llavors, és quina quantitat d'àrid s'ha perdut per atac de l'àcid i, per tant, la diferència entre les corbes granulomètriques realitzades abans i després de l'assaig Próctor. També ens interessa comprovar si el contacte amb àcid durant una setmana influeix en gran mesura en els resultats obtinguts.

Així doncs, a continuació es mostra la diferència de material a cada tamís per a les graves dels dos aiguamolls d'estudi.



**Figura 5.3.6.** Comparació entre la pèrdua i guany de material de les graves dels aiguamolls de Gualba i Arnes.

La grava de Gualba presenta major desgast degut a que té més pèrdua de material als tamisos més grans que no pas la grava d'Arnes. Aquest comportament és el mateix que segueix la grava amb l'aplicació únicament de l'assaig Proctor Normal.

En comparació d'aquests resultats amb els mostrats a la figura 5.3.3., en la que es veu la pèrdua de material aplicant l'assaig Proctor Normal, els resultats presenten la mateixa quantitat de pèrdua de material. D'aquesta manera i d'acord també amb el resultat presentat a solubilitat en àcid de la grava, podem assegurar que el contacte de la grava amb l'àcid a curt termini no li produeix cap tipus de desgast i, per tant, no té influència en la seva resistència mecànica.



## 6. Conclusions

En aquest estudi s'ha avaluat el grau de colmatació de dos aiguamolls utilitzant l'acumulació de sòlids com a indicador. A més, s'ha determinat la resistència del material granular d'ambdós sistemes a fi de donar una explicació a l'elevada acumulació de matèria inorgànica trobada. Les conclusions que se n'extreuen són les següents:

1. Els aiguamolls estudiats presenten acumulacions de sòlids totals a la sortida entre 200-417 g/kg grava i 119-142 g/kg grava a Gualba i Arnes respectivament. Per tant, l'aiguamoll de Gualba està entre 2 i 3 vegades més colmatat que l'aiguamoll d'Arnes. El major grau de colmatació a Gualba és degut, en gran part, a una major càrrega orgànica d'entrada (45 g/m<sup>2</sup>d i 38 g/m<sup>2</sup>d a Gualba i Arnes respectivament).
2. De la distribució de sòlids totals s'extreu que l'aigua presenta camins preferencials en el seu recorregut a través de la grava, ja que aquesta distribució és heterogènia. Factors com la relació longitud – amplada i la distribució de l'afluent a l'entrada de l'aiguamoll expliquen aquest comportament. Així, a Arnes, on l'aiguamoll està dividit en parcel·les amb relació llarg - ample de 3:1 l'acumulació de sòlids és força més uniforme des de l'entrada a la sortida que a Gualba (amb relació llarg-ample d'1:2). D'altra banda, la canonada de distribució d'Arnes, amb assentament diferencial en el terreny produeix una pitjor repartició de l'aigua en l'aiguamoll de manera que unes parcel·les reben més cabal d'aigua, i per tant més càrrega orgànica que altres, cosa que produeix més acumulació de sòlids en aquestes.
3. Els Sòlids Totals com a indicador de la colmatació d'un aiguamoll han d'anar acompanyats de la determinació d'altres paràmetres (com l'índex volumètric de fang o el percentatge de sòlids volàtils respecte als totals) per tal d'avaluar la colmatació de manera més fiable. Això és degut a que la incidència en la colmatació no depèn només de la quantitat sinó també de la qualitat dels sòlids. Per exemple, un fang més mineralitzat decanta millor que no pas un fang orgànic encara que la seva quantitat de sòlids totals pugui ser major, de manera que, tot i poder haver-ne més quantitat, el volum que ocupa el fang acumulat és menor i la grava té més porositat disponible al pas de l'aigua.
4. Valors de sòlids totals més elevats a la sortida dels aiguamolls que no pas a l'entrada dels mateixos (especialment a Gualba), i percentatges de sòlids volàtils molt baixos (<20%) poden ser deguts a causes no relacionades directament amb la

quantitat de sòlids presents a l'aigua affluent, com per exemple, a la degradació del propi material filtrant de l'aiguamoll.

5. La presència de major acumulació de matèria inorgànica cap a la sortida de l'aiguamoll de Gualba (190-402 g M.Inorg/kg grava) en comparació amb l'aiguamoll d'Arnes (93-103 g/kg) pot ser degut a l'esmicolament de la grava de què es compona el medi filtrant dels aiguamolls.
6. En general la grava de Gualba, d'origen granític és menys resistent a esforços mecànics que la grava d'Arnes, d'origen calcari. Malgrat que els minerals de què es compona la grava de Gualba (quars, albita i biotita) són més durs que els d'Arnes (dolomita i calcita majoritàriament), en estar conglomerats en redueixen la resistència al desgast mecànic. La resistència mecànica de la grava calcària present a Arnes és notablement major a la resistència del granit present a Gualba. D'altra banda, la solubilitat de les graves es pot considerar despreciable en front a la resistència mecànica.

## 7. Recomanacions

1. La mesura de l'acumulació de sòlids en un aiguamoll és una tasca difícil degut a què aquests sistemes són força heterogenis. A més és impossible extreure mostres inalterades de l'aiguamoll degut a la naturalesa no cohesiva del material granular. Per tant, es recomana seguir treballant en protocols de presa de mostres que facin que aquestes siguin el més representatives possible del sistema estudiat.
2. Construir aiguamolls de dimensions horitzontals reduïdes que promoguin la repartició de l'aigua en tota la seva amplitud i forcin l'aigua a seguir fluxes en pistó. Relacions llarg/ample inferiors a 1 promouen l'aparició de camins preferencials de l'aigua.
3. Utilitzar materials granulars amb poca tendència a la disgregació per evitar la formació de fins, que disminueixen la porositat efectiva de l'aiguamoll. Les graves d'origen fluvial, com la grava calcària col·locada a Arnes, són una bona opció, tan per la seva resistència com pel seu arrodoniment, que facilita la circulació de l'aigua. Aplicar graves, doncs, com la de Gualba, promou la disgregació del material i, per tant, l'acumulació ràpida de matèria inorgànica al llit de l'aiguamoll.
4. La construcció d'un pretractament que elimini bona part dels sòlids en suspensió ajuda en l'eficiència dels aiguamolls degut a que triguen més a colmar-se, de manera que el seu temps de vida augmenta i el manteniment que requereix es fa més senzill.
5. Col·locar un bon sistema de repartiment de l'aigua a l'entrada de l'aiguamoll per evitar entrades de càrregues de sòlids majors en uns punts que en d'altres. Utilitzar canals amb sobreeixidors com a sistema de repartiment en comptes de canonades perforades ajuda a evitar problemes d'aquest tipus a l'entrada dels aiguamolls.





## 8. Bibliografía

- AENOR, 1999. Test for general properties of aggregates. Part 2: Methods for reducing laboratory samples. UNE-EN 932-2. Madrid.
- AENOR, 1998. Test for chemical properties of aggregates. Part 1: Chemical analysis. UNE-EN 1744-1. Madrid.
- APHA-AWWA-WPCF, 2001. Standard Methods For The Examination of Water and Wastewater (20th ed.). American Public Health Association, Washington DC.
- Bauer, J. (1981). Guía básica de los minerales. Omega, Barcelona.
- Bowmer, K., (1986). Nutrient removal from effluents by an artificial wetland: influence of rhizosphere aeration and preferential flow studied using bromide and dye tracers. *Water Research*, 21, 591-599.
- Brix, H., (1997). Macrophytes play a role in constructed treatment wetlands? *Water Science and Technology* 35 (5), 11–17.
- Caselles-Osorio, A., Puigagut, J., Segú, E., Vaello, N., Granés, F., García, D., García, J. (2007). Solids accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Water Research* 41 (6), 1388–1398.
- Cooper, D., Griffin, P., and Cooper, P. (2005). Factors affecting the longevity of subsurface horizontal flow systems operating as tertiary treatment for sewage effluent. *Water Science and Technology* 51 (9), 127-135. IWA Publishing.
- Drury, W.J., and Mainzhausen, K. (2000). Hydraulic characteristics of subsurface flow wetlands,. 2000 Billings Land Reclamation Symposium. Billings, MT March 20–24.
- García, J, Vivar J., Aromir M. y Mujeriego R. (2003). Role of hydraulic retention time and granular médium in microbial removal of indicator in tertiary treatment reed beds. *Water Research*, 37, 2645-2653.

- García, J. (2004). Humedales contruidos para controlar la contaminación: perspectiva sobre una tecnología en expansión. In: Nuevos Criterios para el Diseño y Operación de Humedales Contruidos. Una Alternativa de Bajo Coste para el Tratamiento de Aguas Residuales. García, J., Morató, J. Y Bayona, J.M. (eds). Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, pp. 7-16.
- García, J., y Corzo, A., (2008). Depuración con Humedales Contruidos, Guía Práctica de Diseño, Construcción y Explotación de Sistemas de Humedales de Flujo Subsuperficial. Noviembre 2008. PDF. <http://upcommons.upc.edu/e-prints/handle/2117/2474>. Consultada gener 2009
- Griffin, P., Wilson, L., Cooper, D., (2008). Changes in the use operation and design of subsurface flow constructed wetlands in a major UK water utility. 11<sup>th</sup> International Conference on Wetland Systems for water Pollution Control. Indore, India, 419-426.
- Hurlbut, C.S. & Klein, C. (1982). Manual de Mineralogía de Dana. Reverté, Barcelona
- Kadlec, R.H., Watson, J.T., (1993). Hydraulics and solids accumulation in a gravel bed treatment wetland. In: Moshiri, G.A. (Ed.), Constructed Wetlands For Water Quality Improvement. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, pp. 227–235.
- Kadlec, R. H. and Knight, R. L., (1996). Treatment Wetlands. Boca Raton, Florida, pp.
- Kadlec, R.H. And Wallace, S.D., (2008) Treatment Wetlands, 2nd ed., Boca Raton, Florida, 1016 pp.
- Knowles, p., Griffin, p., Davies, P., (2009). Complementary methods to investigate the development of clogging within a horizontal sub-surface flow tertiary treatment wetland. Water Research, 30.
- Llorens, E.; Puigagut, J.; García, J. (2009). Distribution and biodegradability of sludge accumulated in a full-scale horizontal subsurface-flow constructed wetland. Desalination and water treatment, 4, 54-58.
- Mitsch, W.J. and Gosselink, J. G., (2000). Wetlands, 3rd ed., John Wiley & Sons, Inc., New York, pp.

NLT – 251/91. Determinación de la durabilidad al desmoronamiento de rocas blancas

NLT – 149/72. Resistencia al desgaste de los áridos por medio de la máquina de Los Ángeles.

Okabe, S., Kuroda, H. and Watanabe, Y. (1998). Significance of biofilm structure on transport of inert particulates into biofilms *Water Science and Technology*, Volume 38, Issues 8-9, 20 November 1998, Pages 163-170.

Pedescoll, A., Uggetti, E., Llorens, E., Granés, F., García, D. And García, J. (2009). Practical method based on saturated hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands. *Ecological Engineering*, doi:10.1016/j.ecoleng.2009.03.016.

PNE 103 500. Determinación de la relación entre la densidad seca y la humedad de un suelo. Proctor Normal.

Puigagut, J., Villaseñor, J., Salas, J.J., Bécares, E., García, J., (2007). Subsurface-flow constructed wetlands in Spain for the sanitation of small communities: a comparative study. *Ecological Engineering* 30 (4), 312–319.

Samsó, R., 2009. Estudi del fenomen de la colmatació en aiguamolls construïts de flux subsuperficial horitzontal. Contrast i aplicació d'un mètode in situ de mesura de la conductivitat hidràulica en aiguamolls construïts. Treball final de carrera d'Enginyeria geològica, UPC.

Sandford, W.E., Steenhuis, T.S., Parlange, J.Y., Surface, J.M., Peverly, J.H., 1995. Hydraulic conductivity of gravel sand as substrates in rock-reed filters. *Ecological Engineering* 4, 321–336.

Solo, F.; García, M.; de Luís, E.; Becares, E., (1999). Role of *Scirpus lacustris* in bacterial and nutrient removal from waste-water. *Water Science & Technology*. 40 (3), 241–7.

## 8. Bibliografia

---

Tanner, C.C.; Sukias, J.P.S.; Upsdell, M.P., (1998). Organic matter accumulation during maturation of gravel-bed constructed wetlands treating farm dairy wastewaters. *Water Research*, 32, 3046-3054.

Winter, K.J., and Goetz, D., (2003). The impact of sewage composition on the soil clogging phenomena of vertical flow constructed wetlands. *Water Science & Technology*. 48 (5), 9–14.

## 9. Annex de càlculs

### Dades dels aiguamolls

**Taula 9.1.** Paràmetres característics de graves de diferents aiguamolls.

	Edat aiguamoll (anys)	Edat grava (anys)	Composició mineral	Porositat grava (%)	Relació longitud - amplada	Profunditat d'aigua (m)
Gualba	8	1	Granítica	45	1:2	0,35 – 0,45
Arnes	14	10	Calcària	41	1:3 (1:0,4)*	0,35 – 0,45

\* Relación longitud – amplada de cada parcel·la.

### Acumulació de sòlids

**Taula 9.2.** ST, SV, IVF als diferents punts d'estudi de l'aiguamoll de Gualba.

Gualba	Sòlids Totals (g/L)	Sòlids Volàtils (g/L)	Matèria inorgànica (g/L)	% SV/ST	IVF (mL/mg)
A6 Gualba	373,30	22,47	350,83	6,02	0,24
A7 Gualba	567,48	20,61	546,87	3,63	0,23
B3 Gualba	402,25	21,9	380,35	5,44	0,28
B7 Gualba	434,08	11,12	422,96	2,56	0,29
C1 Gualba	57,59	21,36	36,23	37,09	1,61
C2 Gualba	114,61	30,01	84,6	26,18	0,70
C5 Gualba	250,22	14,78	235,43	5,91	0,31
C6 Gualba	348,03	19,51	328,52	5,60	0,25
C7 Gualba	269,91	20,37	249,54	7,55	0,31
D2 Gualba	301,02	23,73	277,28	7,88	0,31
D3 Gualba	260,89	21,87	239,03	8,38	0,46
D6 Gualba	375,38	14,13	361,25	3,77	0,26
D7 Gualba	500,75	12,12	488,63	2,42	0,24

**Taula 9.3.** ST, SV, IVF als diferents punts d'estudi de l'aiguamoll d'Arnes.

Arnes	Sòlids Totals (g/L)	Sòlids Volàtils (g/L)	Matèria inorgànica (g/L)	% SV/ST	IVF (mL/mg)
A1 Arnes	74,43	27,98	46,44	37,60	1,043
A3 Arnes	78,70	17,93	60,77	22,79	0,559
A4 Arnes	135,34	25,52	109,83	18,85	0,505
A5 Arnes	183,43	13,99	169,44	7,63	0,298

## 9. Annex de càlculs

B2 Arnes	58,38	23,26	35,12	39,85	1,211
B5 Arnes	157,60	33,90	123,70	21,51	0,409

D1 arnes	160,28	74,90	85,38	46,73	0,515
D3 Arnes	132,2	25,48	106,72	19,28	0,538
D4 Arnes	178,28	22,32	155,96	12,52	0,303
D5 Arnes	165,00	24,93	140,07	15,11	0,271

### Assaig de resistència al Desgast Mecànic

**Taula 9.4.** Dades obtingudes durant l'assaig de resistència al Desgast Mecànic.

Aiguamoll	Repetició	Pes inicial (g)	Pes final (g)	Diferència (g)	Mitja (g)	% Pèrdua material	% Pèrdua mitja	Índex*	Mitja	Desviació estàndar
Gualba	1	501,17	495,14	6,03	7,04	0,0120	0,014	98,80	98,60	0,283
	2	501,47	492,8	8,67		0,0173		98,27		
	3	500,44	494,02	6,42		0,0128		98,72		
Arnes	1	499,64	494,65	4,99	4,58	0,0100	0,009	99,00	99,08	0,213
	2	500,62	497,25	3,37		0,0067		99,33		
	3	500,54	495,16	5,38		0,0107		98,93		
Corbins	1	501,15	497,87	3,28	3,52	0,0065	0,007	99,35	99,30	0,046
	2	499,66	495,94	3,72		0,0074		99,26		
	3	498,29	494,74	3,55		0,0071		99,29		
Verdú	1	499,58	496,54	3,04	4,74	0,0061	0,009	99,39	99,05	0,495
	2	499,17	495,57	3,6		0,0072		99,28		
	3	500,19	492,6	7,59		0,0152		98,48		
Newwet	1	501,32	499,12	2,2	3	0,0044	0,006	99,56	99,40	0,241
	2	500,03	495,65	4,38		0,0088		99,12		
	3	500,77	498,35	2,42		0,0048		99,52		
Moreton	1	501,05	497,63	3,42	3,36	0,0068	0,007	99,32	99,33	0,012
	2	500,34	496,98	3,36		0,0067		99,33		
	3	499,83	496,54	3,29		0,0066		99,34		

### Assaig de Los Angeles

**Taula 9.5.** Dades obtingudes durant l'assaig de Los Angeles.

Aiguamoll	Pes inicial (g)	Pes final (g)	Diferència (g)	% Pèrdua material	Coeficient de LA
Arnes	5017,5	3854,6	1162,9	23,18	23,26
Gualba	5001,2	3348,5	1652,7	33,05	33,05
Corbins	5002	4033,5	968,5	19,36	19,37
Verdú	5000,6	4173,5	827,1	16,54	16,54

Assaig Proctor Normal**Taula 9.6.** Dades de granulometria abans i després d'aplicar l'assaig a la grava de Gualba.

% Mitja Gualba			
	Granulometria abans	Granulometria després	diferència
1"	0	0	0
3/4"	0	0	0
1/2"	3,584320151	2,653470068	-0,93085
3/8"	37,31738474	34,91462732	-2,40276
nº 4	42,23774909	41,92762343	-0,31013
nº 10	14,82852452	17,0473434	2,218819
nº 16	1,782316615	2,407821266	0,625505
nº 40	0,247692853	0,746498618	0,498806
nº 100	0,001609626	0,203901403	0,202292
nº 200	0,000402406	0,098714489	0,098312

**Taula 9.7.** Dades de granulometria abans i després d'aplicar l'assaig a la grava d'Arnes.

% Mitja Arnes			
	Granulometria abans	Granulometria després	diferència
1"	0	0	0
3/4"	0	0	0
1/2"	2,85	2,44	-0,409
3/8"	21,20	19,58	-1,618
nº 4	65,55	64,83	-0,721
nº 10	10,35	12,13	1,782
nº 16	0,05	0,52	0,473
nº 40	0,0013	0,29	0,292
nº 100	0,0009	0,12	0,117
nº 200	0	0,08	0,084

Assaig Próctor Normal i Solubilitat en àcid**Taula 9.8.** Corbes granulomètriques abans i després d'aplicar l'assaig a la grava de Gualba.

Gualba		
Diàmetre tamís	Corba granulomètrica abans	Corba granulomètrica després
1"	100	100
3/4"	100	100
1/2"	97,96	98,16
3/8"	70,32	71,81
nº 4	51,90	55,23
nº 10	17,75	19,13
nº 16	2,11	2,77
nº 40	0,24	1,07
nº 100	0,01	0,41
nº 200	0,005	0,16

## 9. Annex de càlculs

**Taula 9.9.** Corbes granulomètriques abans i després d'aplicar l'assaig a la grava d'Arnes.

Arnes		
Diàmetre tamís	Corba granulomètrica abans	Corba granulomètrica després
1"	100	100
3/4"	100	100
1/2"	96,72	97,80
3/8"	83,43	84,40
nº 4	34,46	37,72
nº 10	13,95	15,05
nº 16	0,33	0,84
nº 40	0,11	0,38
nº 100	0,02	0,16
nº 200	0,003	0,17 <sub>i</sub>

**Taula 9.10.** Dades granulomètriques de la grava de Gualba per la comparació amb Arnes.

Gualba				
Granulometría abans assaig (g)	% que passa abans	Granulometría després assaig (g)	% que passa després	Diferència
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
16,3	2,04	14,72	1,86	-0,17
237,58	29,68	225,71	28,59	-1,09
385,07	48,10	358,43	45,40	-2,70
142,11	17,75	153,13	19,40	1,65
16,89	2,11	22,16	2,81	0,70
1,9	0,24	8,56	1,08	0,85
0,09	0,01	3,29	0,42	0,41
0,04	0,005	1,25	0,16	0,15

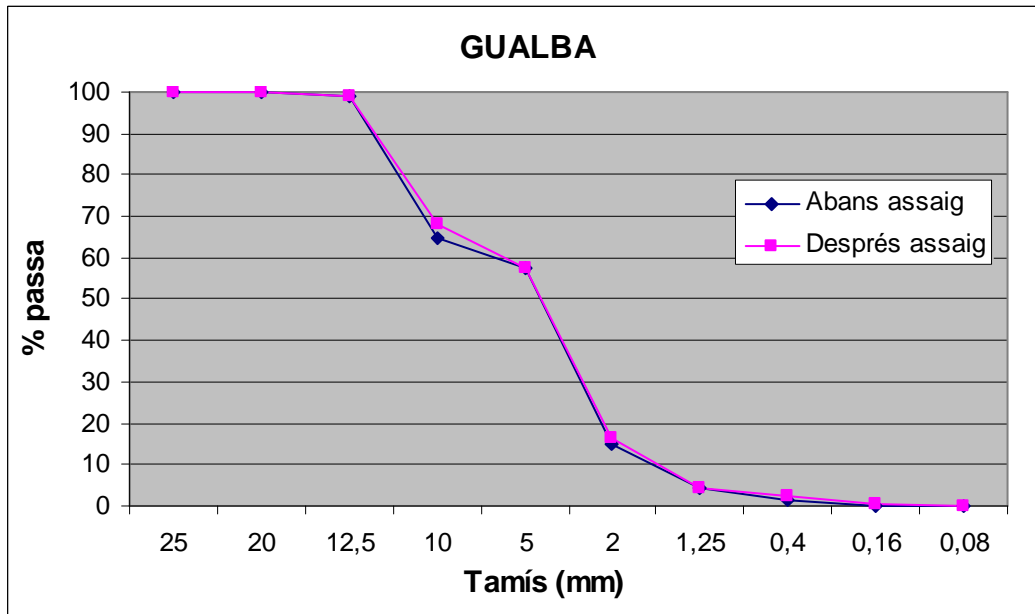
**Taula 9.11.** Dades granulomètriques de la grava d'Arnes per la comparació amb Gualba.

Arnes				
Granulometría abans assaig (g)	% que passa abans	Granulometría després assaig (g)	% que passa després	Diferència
0	0	0	0	0
0	0	0	0	0
26,31	3,27	17,66	2,26	-1,01
133,11	16,57	125,32	16,05	-0,52
526,59	65,54	500,41	64,10	-1,44
112,12	13,95	120,94	15,49	1,54
2,66	0,33	6,73	0,86	0,53
0,9	0,11	3,09	0,40	0,28
0,14	0,017	1,25	0,16	0,14
0,03	0,004	1,39	0,18	0,17

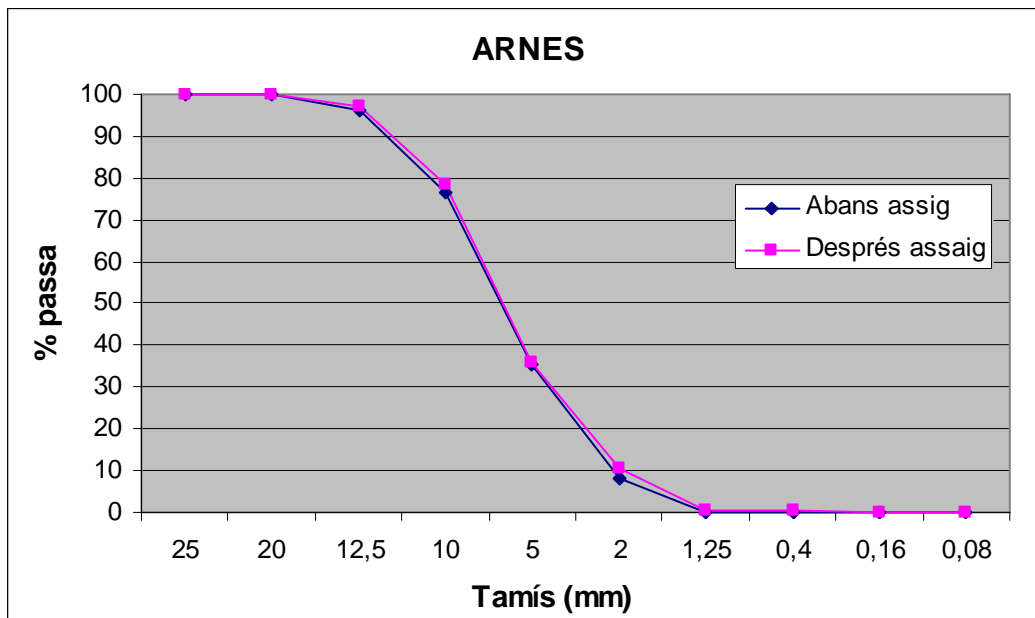


## 10. Annex de figures

### Corbes granulomètriques assaig Proctor Normal



**Figura 10.1.** Diferència entre les corbes granulomètriques de la grava de Gualba abans i després de l'assaig Proctor Normal.



**Figura 10.2.** Diferència entre les corbes granulomètriques de la grava de Gualba abans i després de l'assaig Proctor Normal.